

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Potenciál úspor vyplývající z použití moderních
světelných zdrojů ve vnitřních pracovních prostorech**

**The potential of savings resulting from the use of modern
light sources in indoor workplaces**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 6. 5. 2011

.....
Zbyněk Richtř

Poděkování

Děkuji vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D. a panu prof. Ing. Karlu Sokanskému, CSc. za metodickou pomoc, cenné rady a vstřícný přístup.

Abstrakt

Tato diplomová práce zkoumá potenciál úspor vyplývajících z použití výkonových světelných diod pro osvětlování. Jsou zde uvedeny historické milníky ve vývoji světelných diod, předpovědi hodnot výkonnostních parametrů v tomto desetiletí včetně jejich definic. Obsaženy jsou principy vzniku záření ve světelných diodách a popsány jejich vlastnosti. Dále jsou uvedena základní zapojení, metody pro řízení světelného toku diod a vliv na kvalitativní a kvantitativní parametry. Je zde také navržena diodová osvětlovací soustava a porovnána se soustavou s kompaktními zářivkami.

Klíčová slova

Světelná dioda, LED, měrný výkon, index barevného podání, náhradní teplota chromatičnosti, LED budič, stmívání, amplitudová modulace, pulzně šířková modulace.

Abstract

This diploma thesis is to examine the potential of savings resulting from the use of power light-emitting diodes for illumination. There are the historical milestones in the development of light-emitting diodes, predictions of the values of performance parameters in this decade, including their definitions. There is included the principles of radiation in the light-emitting diodes and describe their properties. Below are listed the basic circuits, methods for driving the luminous flux of light-emitting diodes and influence on the qualitative and quantitative parameters. It is also designed diodes lighting system and compared the system with compact fluorescent lamps.

Keywords

Light-emitting diode, LED, luminous efficacy, color rendering index, correlated color temperature, LED driver, dimming, amplitude modulation, pulse width modulation.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam	Jednotka
E	intenzita osvětlení	[lx]
\bar{E}_m	udržovaná intenzita osvětlení	[lx]
E_{min}	minimální intenzita osvětlení	[lx]
E_{min}/\bar{E}_m	rovnoměrnost osvětlení	[]
E_{max}	maximální intenzita osvětlení	[lx]
$E_{\lambda\%}$	poměrná spektrální zářivost	[%]
D	střída	[%]
I	elektrický proud	[A]
I_{av}	střední hodnota proudu	[A]
I_F	propustný proud	[A]
$I_{výst}$	výstupní proud	[A]
k	vlnový vektor	[m ⁻¹]
l	délka	[mm]
P	elektrický příkon	[W]
P_i	instalovaný příkon osvětlovací soustavy	[W]
R_a	všeobecný index barevného podání	[]
R_{FB}	zpětnovazební odpor	[Ω]
R_p	předřadný odpor	[Ω]
R_t	tepelný odpor	[K/W]
t	čas	[s]
T	teplota	[°C]
T_{PN}	teplota PN přechodu	[°C]
T_{cn}	náhradní teplota chromatičnosti	[K]
U	elektrické napětí	[V]
U_F	propustné napětí	[V]
U_{FB}	zpětnovazební napětí	[V]
U_{vst}	vstupní napětí	[V]
$U_{výst}$	výstupní napětí	[V]
ν	frekvence záření	[Hz]
W	energie záření	[eV]
W_c	energie vodivostního pásu	[eV]
W_g	energie zakázaného pásu	[eV]
W_v	energie valenčního pásu	[eV]
z_{fs}	činitel funkční spolehlivosti světelných zdrojů	[]
z_p	činitel znečištění ploch místnosti	[]
z_s	činitel znečištění svítidel	[]
z_z	činitel stárnutí světelných zdrojů	[]
η	měrný výkon	[lm/W]
λ	vlnová délka	[nm]
Φ	světelný tok	[lm]
\$	americký dolar	[]

h	Planckova konstanta	$4,135\,667\,33 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
c	rychlost světla ve vakuu	$299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Zkratka	Význam
AM	Amplitude Modulation (amplitudová modulace)
ČSN	Česká státní norma
AlInGaP	hliník indium gallium fosfid
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování)
InGaN	indium gallium nitrid
GaAlAs	gallium hliník arsenid
GaAs	gallium arsenid
GaAsP	gallium arsenid fosfid
GaN	gallium nitrid
GaP	gallium fosfid
LED	Light-Emitting Diode (světelná dioda)
LENI	Lighting Energy Numeric Indicator (číselný ukazatel energie na osvětlení)
PN	Positive-Negative
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
RGB	Red Green Blue (červená zelená modrá)
SEPIC	Single Ended Primary Inductor Converter
SiC	karbid křemíku
ss	stejnoseměrný
UGR	Unified Glare Rating (jednotný činitel oslnění)
USA	United States of America (Spojené státy americké)
VŠB	Vysoká škola báňská
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$	yttrium-hliník-kyslík:cer

OBSAH

0	ÚVOD	1
1	HISTORIE VYUŽITÍ VÝKONOVÝCH SVĚTELNÝCH DIOD PRO VŠEOBECNÉ OSVĚTLOVÁNÍ.....	2
1.1	Raný vývoj a první experimenty	2
1.2	LED jako indikátor.....	2
1.3	Bílá LED	3
1.4	Budoucnost LED	5
1.4.1	Předpověď vývoje měrného výkonu.....	5
1.4.2	Dosažitelné hodnoty měrných výkonů.....	6
1.4.3	Náklady na jednotku světelného toku.....	6
1.4.4	Předpovědi účinnostních parametrů v roce 2020	7
2	TEORIE VZNIKU SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ VE VÝKONOVÝCH SVĚTELNÝCH DIODÁCH	12
2.1	Fyzikální podstata vzniku záření v LED	12
2.2	Základní konstrukční provedení LED.....	14
2.2.1	Indikátorová LED.....	14
2.2.2	Výkonová LED	16
2.3	Vliv teploty na parametry LED.....	16
2.3.1	Závislost světelného toku LED na teplotě	16
2.3.2	Doba života LED.....	17
2.4	Druhy bílých světelných diod	18
2.4.1	Světelná dioda RGB	18
2.4.2	Modrá světelná dioda s luminoforem.....	19
2.4.3	Srovnání principů tvorby bílé barvy v LED	21
3	NAPÁJENÍ VÝKONOVÝCH SVĚTELNÝCH DIOD SE ZAMĚŘENÍM NA STMÍVÁNÍ (PŘEDŘADNÍKY)	22
3.1	Princip řízení světelného toku LED	22
3.1.1	Voltampérová charakteristika LED	22
3.1.2	Funkce proudového zdroje.....	22
3.2	Topologie budičů výkonových LED	24
3.2.1	Topologie buck.....	24
3.2.2	Topologie boost.....	25
3.2.3	Topologie SEPIC.....	26

3.3	Topologie zapojení vyššího počtu světelných diod.....	26
3.3.1	Společné nastavení proudů ve větvích.....	27
3.3.2	Rozdělené nastavení proudů ve větvích.....	27
3.4	Stmívání	28
3.4.1	Nízkofrekvenční PWM stmívání	30
3.4.2	Vysokofrekvenční PWM stmívání.....	31
4	VLIV ŘÍZENÍ VÝKONOVÝCH SVĚTELNÝCH DIOD NA JEJICH KVALITATIVNÍ A KVANTITATIVNÍ PARAMETRY (SVĚTELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY).....	33
4.1	Vnímaná úroveň světelného toku při stmívání	33
4.2	Vliv stmívání na kvalitativní parametry.....	34
4.2.1	Změny spektra záření	34
4.2.2	Změny chromatičnosti	37
4.3	Vliv stmívání na kvantitativní parametry	38
4.3.1	Změny světelného toku	38
4.3.2	Změny účinnosti	39
5	NÁVRH A POROVNÁNÍ OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV S KLASICKÝMI A MODERNÍMI SVĚTELNÝMI ZDROJI (LED).....	40
5.1	Osvětlení v místnosti B 2.21	40
5.1.1	Navržené osvětlovací soustavy.....	41
5.1.2	Požadavky na osvětlení v místnosti B 2.21.....	41
5.1.3	Porovnání parametrů navržených osvětlovacích soustav	42
5.2	Osvětlení v místnosti A 2.31	44
5.2.1	Navržené osvětlovací soustavy.....	44
5.2.2	Požadavky na osvětlení v místnosti A 2.31.....	45
5.2.3	Porovnání parametrů navržených osvětlovacích soustav	46
6	ENERGETICKÉ A EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ NAVRŽENÝCH OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV.....	48
6.1	Osvětlení v místnosti B 2.21	48
6.1.1	Vyhodnocení navržených soustav.....	48
6.2	Osvětlení v místnosti A 2.31	50
6.2.1	Vyhodnocení navržených soustav.....	50
7	ZÁVĚR	53
8	POUŽITÉ ZDROJE.....	55
	SEZNAM PŘÍLOH.....	60

0 ÚVOD

Světelné diody přestávají být v posledních dvou desetiletích pouze indikátorovými prvky. Neustálé zdokonalování výrobních procesů zvyšuje účinnost extrakce světla z jejich polovodičového přechodu natolik, že jejich parametry dospěly do stavu použitelnosti jako zdroje pro osvětlování vnitřních i venkovních prostorů.

Energetická náročnost osvětlovacích soustav tvoří okolo pětiny celkové světové spotřeby elektrické energie. Nasazování diodových svítidel umožňuje výrazně snížit provozní náklady na osvětlení, protože díky vysoké účinnosti postačuje pro vytvoření stejných světelných podmínek nižší příkon svítidel. Správně navržené diodové osvětlovací soustavy začínají v současnosti převyšovat i ostatními parametry klasické osvětlovací soustavy. Tato diplomová práce posoudí na praktickém příkladě, jak velkých úspor v osvětlování lze běžně dosahovat.

Úvodní kapitola poskytne přehled historie polovodičových světelných diod a odhad dalšího vývoje v budoucnosti. Ve druhé kapitole bude popsán princip vzniku záření ve světelných diodách, budou uvedeny typy světelných diod a jejich charakteristické vlastnosti. Další teoretická kapitola bude věnována technickým prostředkům k řízení světelného toku a v návaznosti na ni bude popsán vliv stmívání diod na vlastnosti vytvářeného světelného záření.

Praktická část bude tvořena návrhem osvětlovací soustavy s diodovými svítidly srovnatelných parametrů jako osvětlovací soustava s konvenčním druhem světelných zdrojů a jejich ekonomickým a energetickým zhodnocením.

1 HISTORIE VYUŽITÍ VÝKONOVÝCH SVĚTELNÝCH DIOD PRO VŠEOBECNÉ OSVĚTLOVÁNÍ

1.1 Raný vývoj a první experimenty

Na začátku vývoje světelných diod byl objev elektroluminiscence. Roku 1907 poprvé pozoroval tento jev při studiu usměrňovačů britský experimentátor Henry Joseph Round. V článku publikovaném ve stejném roce v časopise *Electrical World* ještě neuvádí pojem dioda; toto zařízení, vyrobené na bázi karbidu křemíku (SiC), mělo charakter spíše Schottkyho diody než klasické diody s PN přechodem. [3]

Ve dvacátých letech 20. století zkoumal stejný jev sovětský fyzik Oleg Vladimirovich Losev při pokusech s krystaly SiC z rádiových přijímačů. Z počátku byl zmatený z fyzikálního původu vzniklého světelného záření. Z rychlosti vypařování kapek benzenu ze zářících míst však zjistil, že světlo nebylo generováno tepelným zářením (inkandescencí), nýbrž elektroluminiscencí při podstatně nižší teplotě. [3], [11]

V letech 1933–1939 došlo k rozvoji kvantové teorie pevných látek, umožňující vysvětlení vlastností pevných látek včetně kovů a polovodičů. Důležitý krok v oblasti výzkumu fyzikálních procesů učinil roku 1940 pracovník Bellových laboratoří Russell Ohl objevem polovodičů typu P a N. Vynález tranzistoru v roce 1947 byl významnou událostí pro vývoj světelných diod, ale až počátek 50. let přinesl přesné vysvětlení a experimentální potvrzení jevu elektroluminiscence na základě pásové teorie. [6]

Další pozorování vedla v 50. letech k rozvoji jiných typů polovodičů, např. GaAs. O popis emise infračerveného záření z této sloučeniny se nejvíce zasloužil velmi podrobnou studií z roku 1955 výzkumník Rubin Braunstein. Patent na tento typ diody však získali až v roce 1961 pracovníci Texas Instruments, pánové Bob Biard a Gary Pittman. [49]

1.2 LED jako indikátor

První polovodičová dioda emitující záření ve viditelné části spektra byla vyvinuta v roce 1962. Tato červeně zářící LED sloučeniny GaAsP je připisována pracovníkovi společnosti General Electric Nicku Holonyakovi, studentovi vynálezce tranzistoru Johna Bardeena. V roce 1968, kdy se tento typ diody stal komerčně dostupným, se při jmenovitém proudu 20 mA její svítivost pohybovala v rozmezí pouhých 1 mcd až 10 mcd. [10], [18]

Americká společnost Monsanto byla v roce 1968 tím komerčním subjektem, který jako první zavedl hromadnou výrobu LED. Klíčovým technickým inovátorem ve společnosti byl George Craford, první postgraduální student Nicka Holonyaka, tehdy už profesora univerzity v Illinois. Roku 1972 demonstroval Craford první žlutou LED – na podkladový substrát GaAs

nanesená aktivní vrstva GaAsP dopovaná dusíkem. Přechodem na substrát fosfidu galitého (GaP) pak bylo možné získat i zelené a oranžové světlo. [17], [18]

S objevem nové polovodičové sloučeniny GaAlAs na počátku 80. let bylo dosaženo 10x vyššího jasů. Nově byl zaveden heteropřechod, snížilo se napětí potřebné pro provoz, což současně s vyšší efektivitou extrakce světla z tohoto typu přechodu znamenalo vyšší účinnost. Tyto diody se prosadily především v optických systémech pro přenos dat a čtečkách čárových kódů. Nevýhodou byla dostupnost diod zařících pouze na 660 nm a také vyšší degradace než u předešlých sloučenin. Zlepšení těchto parametrů přišlo s rozvojem laserových diod. [18]

Technologie přejaté z výroby laserových diod vedly na konci 80. let ke zlepšení účinnosti další sloučeniny – AlInGaP. Za použití stejných základních technologií bylo možné vyrobit všechny dosavadní barvy – červenou, žlutou, oranžovou i zelenou. Přitom degradace působením tepla a vlhkosti, tedy problémů předešlé technologie, se výrazně snížila. [6], [18]

Poslední pestrá barva z barevného spektra, modrou, se podařilo vygenerovat z nitridu galitého (GaN) dopovaného hořčíkem poprvé v roce 1972. Tehdejší stav poznání však neumožňoval dvojici objevitelů – Jacques Pankove a Paul Maruska – zvyšování svítivosti tohoto typu LED. Ještě 10 let poté byl o GaN k dispozici pouze jediný zápis. Až roku 1989 se podařilo skupině kolem japonského vědce Isama Akasakiho technologicky vyřešit dopování polovodiče typu P a epitaxní růst v této sloučenině. Uvedená verze LED měla účinnost pouze 1 %; o čtyři roky později představil dokonalejší řešení Shuji Nakamura z japonské společnosti Nichia – modrou a zelenou InGaN LED s dvojitým heteropřechodem a desetinásobnou účinností. [33], [42]

1.3 Bílá LED

Původní projekt japonské společnosti Nichia pro získání zelené barvy z čipu generujícího modré světlo vyústil v realizaci bílé LED. Roku 1995 byl poprvé použit princip založený na kombinaci modrého záření čipu InGaN s vrstvou žlutého luminoforu o složení $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$. Smíšením modrého záření vlnové délky okolo 460 nm a záření luminoforu s emisním vrcholem na přibližně 540 nm bylo vytvořeno bílé světlo. První komerčně dostupné LED představila stejná společnost o dva roky později. [17], [36]

S cílem využití LED jako zdroje pro osvětlování bylo pro zvýšení světelného toku bílé LED nutno zvýšit její výkon. Divize Philipsu pro osvětlování, společnost Lumileds Incorporated, představila v roce 1999 koncept výkonové světelné diody. Její příkon 1 W znamenal dvacetinásobek příkonu dosavadních 5mm bílých LED indikátorů, přičemž účinnost byla o 50 % vyšší. [10]

V následujících letech se vývoj zaměřoval především na zvyšování měrného výkonu těchto vysoce svítivých bílých LED. Měrný výkon je světelnotechnická veličina vyjadřující účinnost přeměny elektrického příkonu jako vstupní veličiny na světelný tok, vyjadřuje se tedy

v lumenech na watt (lm/W). Na přelomu tisíciletí byl překonán měrný výkon žárovky a dalších tepelných světelných zdrojů. Přetrvávajícím problémem však zůstávalo odvádění tepla z čipu. Měrné výkony ohlašované výrobci po celém světě tak byly dosahovány v dalších letech při proudu pouze 20 mA, protože při vyšších proudech měrný výkon prudce klesal.

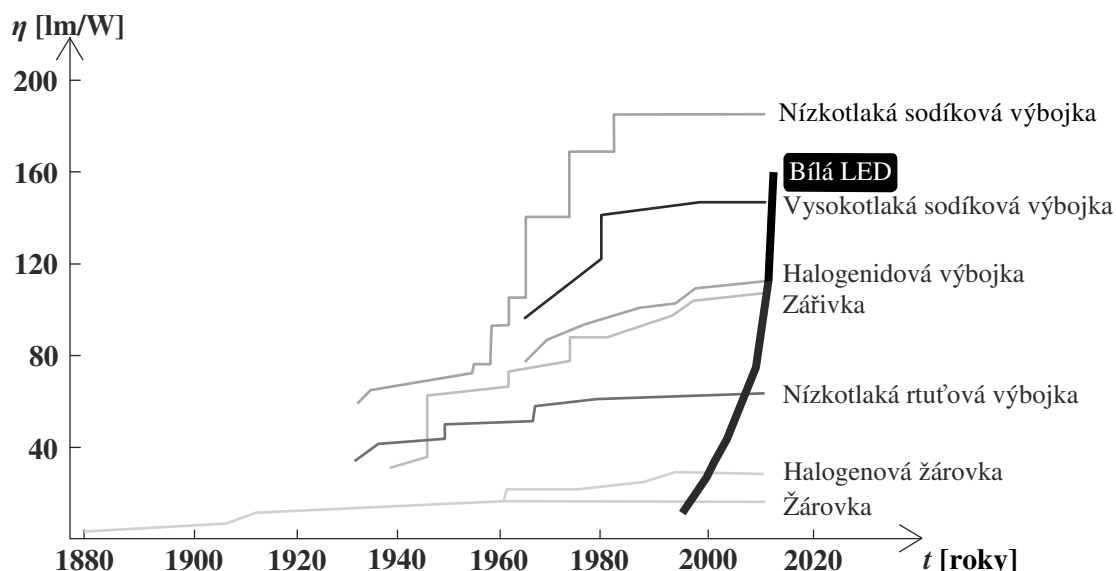
Postupná konstrukční vylepšení umožnila zvýšit hodnotu proudu na celosvětový standard 350 mA. Historickým milníkem bylo uvedení na trh bílé LED s měrným výkonem nad 100 lm/W při tomto typickém proudu. Tuto hranici prolomila jako první americká společnost Cree v roce 2007 s XLamp LED. Technologickou špičku potvrdila tato společnost ve stejném roce předvedením jednočipové LED. Vzorek vydávající světelný tok 1050 lm studeně bílé barvy při proudu 4 A dosáhnul měrného výkonu 72 lm/W. Uvedení na trh se dočkala až o dva roky později. [30], [31]

Hranici měrného výkonu 200 lm/W překročila jako první opět společnost Cree, v roce 2010 takto demonstrovala své vytrvalé úsilí. V laboratorních podmínkách se jejím technikům podařilo dosáhnout měrného výkonu 208 lm/W při náhradní teplotě chromatičnosti 4579 K. Testy proběhly při pokojové teplotě, proud činil 350 mA. Masová produkce se dá očekávat až za několik let, stejně jako u každého prototypu. [34]

Prozatím nejvyššího měrného výkonu, 249 lm/W, dosáhla skupina výzkumníků japonské společnosti Nichia v roce 2010. Při napětí sníženém na 2,89 V, proudu 20 mA produkoval čip o ploše (0,45 x 0,45) mm světelný tok 14,4 lm náhradní teploty chromatičnosti 4600 K. Vedle sníženého napětí bylo použito několik inovativních technik, z nichž nejzásadnější byly realizovány ve vnitřní struktuře. Tvar safírového substrátu a vrchní elektroda ze slitiny oxidů india a cínu snížila ztráty absorpcí záření. Yukio Narukawa, vedoucí této výzkumné skupiny, však připouští, že použití tohoto tvarovaného substrátu a speciální elektrody zesložituje a zdražuje výrobu nad míru únosnou pro komerční rozšíření. [8], [35]

Snahy o plnohodnotnou náhradu žárovky s příkonem 60 W byly naplněny na počátku roku 2011. Jako první oznámila dostupnost této náhrady na trhu společnost Philips. Další z předních světových výrobců LED sice také oznámili plán a očekávané parametry svých výrobků v této kategorii, ovšem prozatím zůstalo pouze u prototypů. Parametry 60W „LED žárovky“ předepisuje mezinárodní program vlády USA Energy Star, podporující užívání energeticky úsporných spotřebních výrobků. Pro získání tohoto označení musí náhrada 60W žárovky splňovat mimo jiné minimální světelný tok 800 lm, náhradní teplotu chromatičnosti 2700 K, index barevného podání alespoň 80 a tříletou záruku. Philips AmbientLED o příkonu 12,5 W překračuje tyto požadavky s 806 lm a šestiletou zárukou. [19]

Za svou poměrně krátkou historii stačila bílá LED překonat z pohledu efektivity přeměny elektrické energie na světelnou vyjma vysokotlaké sodíkové výbojky už všechny světelné zdroje pro všeobecné osvětlení. Strmý nárůst měrného výkonu komerčně dostupných LED a vývoj ostatních zdrojů znázorňuje obr. 1.

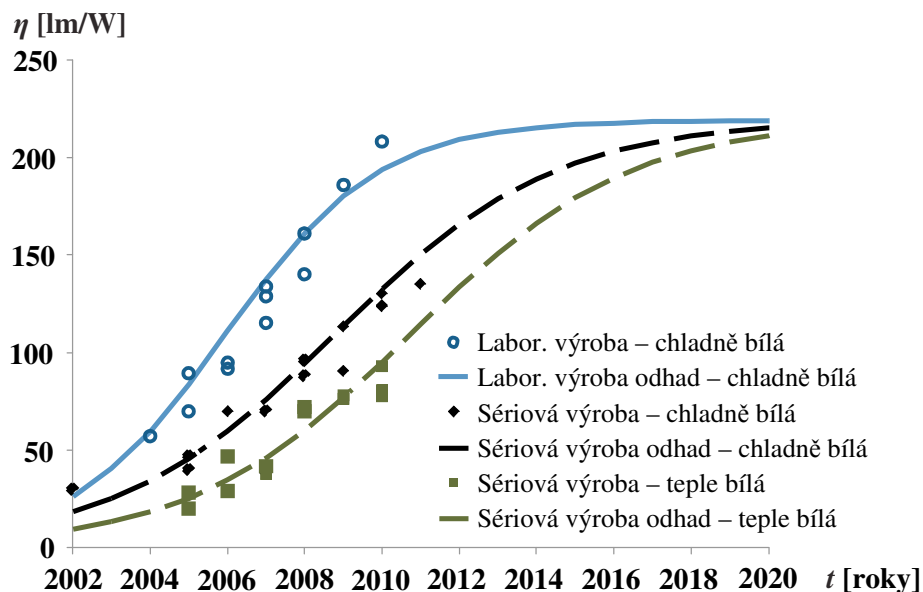


Obr. 1 Historický vývoj měrných výkonů světelných zdrojů dostupných na trhu [26]

1.4 Budoucnost LED

1.4.1 Předpověď vývoje měrného výkonu

Odhad růstu měrného výkonu LED v dalších letech zpracovává na základě výsledků výzkumů a teoretických prací Ministerstvo energetiky USA. Předpověď předpokládaného vývoje měrného výkonu LED z tohoto roku nejčastěji používaných typů diod udává obr. 2. [50]



Obr. 2 Předpokládaný vývoj měrného výkonu LED, $P = 1 \text{ W}$, $I = 350 \text{ mA}$ [51]

Ministerstvo energetiky USA zhodnotilo, že se předchozí prudký nárůst měrných výkonů u nově produkovaných LED bude zpomalovat s přibližováním k maximálním dosažitelným hodnotám. Přesto se hodnota měrného výkonu 219 lm/W jeví jako dosažitelný vývojový cíl.[51]

1.4.2 Dosažitelné hodnoty měrných výkonů

Dosavadní vývoj světelných diod původně ukazoval na silnou závislost měrného výkonu bílých LED především na náhradní teplotě chromatičnosti vyzářeného světla a také na indexu barevného podání. Vychází otázka, jaké jsou limity měrného výkonu? Tab. 2 udává teoretické maximální a prakticky dosažitelné měrné výkony výkonových světelných diod vyzařujících bílé světlo vzniklé smíšením tří základních barev (RGB).

Tab. 2 Teoretické a prakticky dosažitelné hodnoty měrných výkonů LED v závislosti na náhradní teplotě chromatičnosti a indexu barevného podání [51]

T_{cn} [K]	Teoretická hodnota měrného výkonu η [lm/W]			Prakticky dosažitelná hodnota měrného výkonu η [lm/W]		
	R_a []			R_a []		
	70	80	90	70	80	90
2700	428	407	394	240	228	221
3800	407	389	379	228	219	212
5000	380	365	356	213	204	199

Prakticky dosažitelné hodnoty měrných výkonů závisí na účinnosti přeměny elektrické energie na světelnou a jsou odhadovány na 56 % teoretických maximálních hodnot. Je patrné, že index barevného podání nemusí záviset tak silně na měrném výkonu, jak se dříve předpokládalo. Při náhradních teplotách chrom. vyzařovaného světla v rozsahu od 2700 K do 5000 K se prakticky dosažitelné měrné výkony při stejném indexu bar. podání neliší o více než 13 %. V případě indexu bar. podání v rozsahu od 70 do 90 při stejné teplotě chrom. není rozdíl v hodnotách prakticky dosažitelných měrných výkonů větší než 9 %. [51]

1.4.3 Náklady na jednotku světelného toku

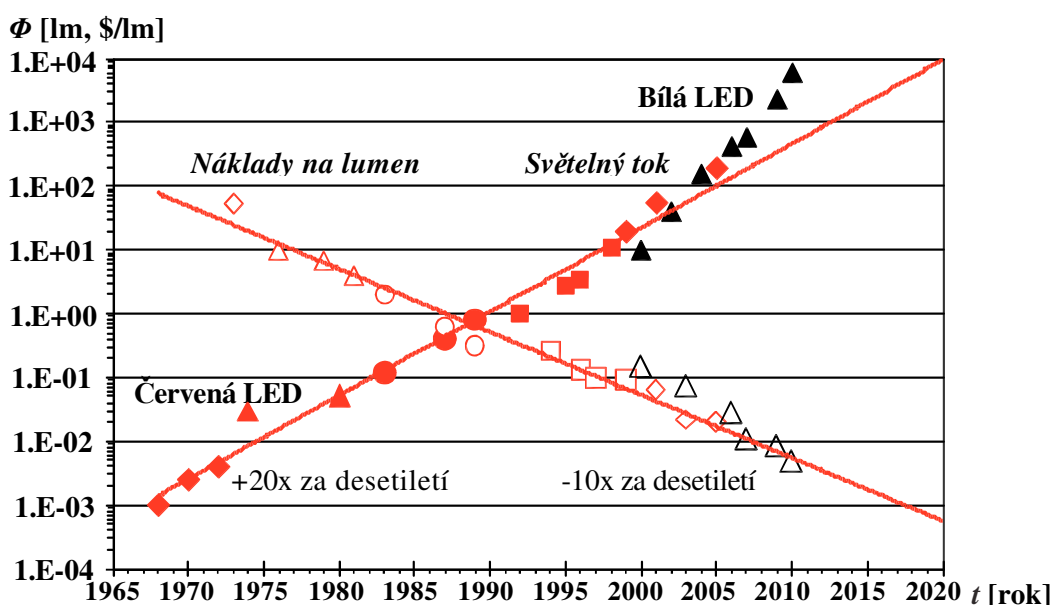
Ceny světelných zdrojů jsou typicky porovnávány na základě ceny za kilolumen. Příklad pořizovacích nákladů svět. zdrojů v roce 2010 v USA pro osvětlování interiérů uvádí tab. 1.

Tab. 1 Příklad pořizovacích nákladů světelných zdrojů na kilolumen [51]

Světelný zdroj	Náklady na kilolumen [\$]
Žárovka 60 W	0,5
Kompaktní zářivka 13 W	2
Kompaktní zářivka 13 W, stmívatelná	10
2 x 32W lineární zářivka T8 s předřadníkem	4
LED „žárovka“ (E27, náhrada 60W žárovky, stmívatelná)	50

Pořizovací náklady na kilolumen vyzářený stmívatelným diodovým světelným zdrojem imitujícím vzhled klasické žárovky jsou 100x vyšší než náklady na kilolumen z žárovky a 5x vyšší než náklady na kilolumen ze stmívatelné 13W kompaktní zářivky, i přestože se cena LED výrazně snížila v průběhu let a bude i nadále klesat. V příštích letech, kdy se na trh dostanou výkonnější a levnější modely, se předpokládá jejich vyšší konkurenceschopnost z hlediska pořizovacích nákladů. [51]

Posledních 40 let platilo pravidlo známé jako Haitzův zákon, že se světelný tok z LED zvyšoval dvacetinásobně každé desetiletí, zatímco náklady v ceně za lumen se snižovaly desetinásobně za stejné období. Obr. 3 uvádí také odhad cen a svět. toku do roku 2020. [50]



Obr. 3 Nárůst světelného toku LED a pokles nákladů na lumen [50]

1.4.4 Předpovědi účinnostních parametrů v roce 2020

Na základě kvalifikovaných odhadů odborníků z výzkumu a vývoje z roku 2011 byly stanoveny také cíle účinnostních parametrů LED čipů a LED příslušenství na rok 2020. Předpovědi byly sestaveny pro dva základní principy získání bílého světla ze světelných diod.

Modré LED s luminoforem

Analýzu účinnostních parametrů v LED získávajících bílé světlo konverzí modrého světla na žluté v luminoforu shrnuje obr. 4. Pro úplnost následuje popis vybraných termínů použitých v grafech.

Definice účinnostních parametrů

Elektrická účinnost

Elektrická účinnost představuje ohmické ztráty v LED čipu a ztráty nosiči náboje nevyužitých v aktivní oblasti. Ohmické ztráty zvyšují napětí na diodě v propustném směru. [50]

Vnitřní kvantová účinnost

Vnitřní kvantová účinnost je poměr fotonů emitovaných z aktivní oblasti polovodičového přechodu k počtu elektronů vstříknutých do aktivní oblasti. [50]

Účinnost extrakce světla

Je poměr fotonů emitovaných ze zapouzdřeného čipu do vzduchu k fotonům generovaným v aktivní oblasti. Je zahrnut světelný tok odražený zpět do čipu, ale jsou vyloučeny ztráty spojené s konverzí v luminoforu. [50]

Vnější kvantová účinnost

Vnější kvantová účinnost je poměr získaných fotonů k vstříknutým elektronům. Jedná se o součin vnitřní kvantové účinnosti a účinnosti extrakce světla. [50]

Proudový pokles

Představuje rozdíl ve vnitřní kvantové účinnosti (při 25 °C) mezi maximem při velmi nízké proudové hustotě a jmenovité proudové hustotě (běžně 35 A/cm²). LED svítidla mohou pracovat na stále vyšších proud. hustotách, což vede k dodatečnému proudovému poklesu. [50]

Rozptylová účinnost

Poměr fotonů emitovaných z LED čipu k počtu fotonů emitovaných z polovod. čipu. [50]

Spektrální účinnost

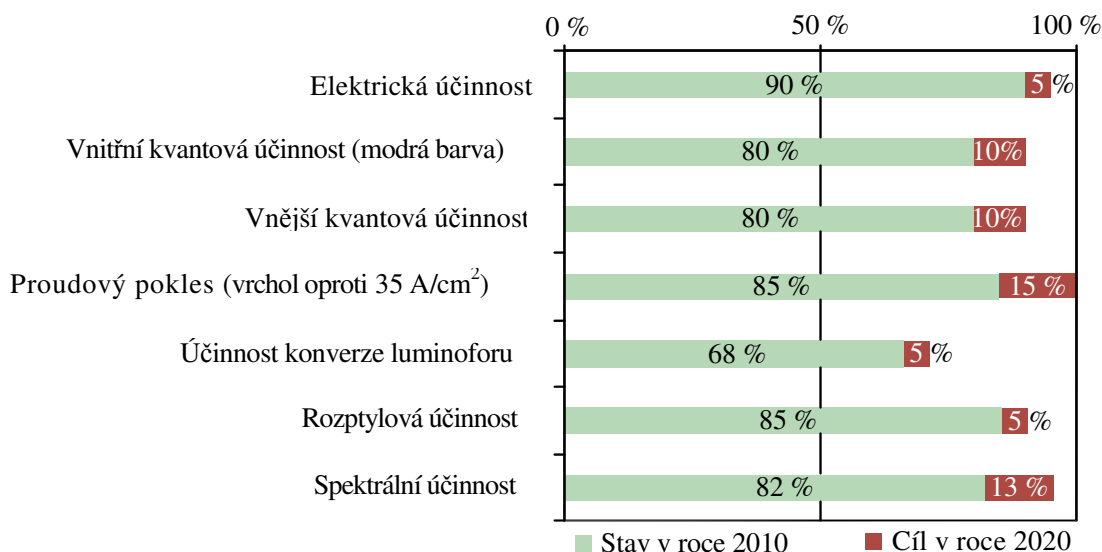
Vyjadřuje poměr měrného výkonu vyzařovaného spektra dané diody a teoretického maximálního měrného výkonu s určitým R_a a T_{cn} . [50]

Dodatečný proudový pokles

Vzniká, když je čip provozován na vyšší než jmenovité proudové hustotě. K této možnosti se v praxi přistupuje v případě, kdy je žádoucí dosáhnout vyššího světelného toku se stávajícími LED čipy; lze tak výrazně snížit celkové náklady. [50]

Teplotní citlivost světelného toku

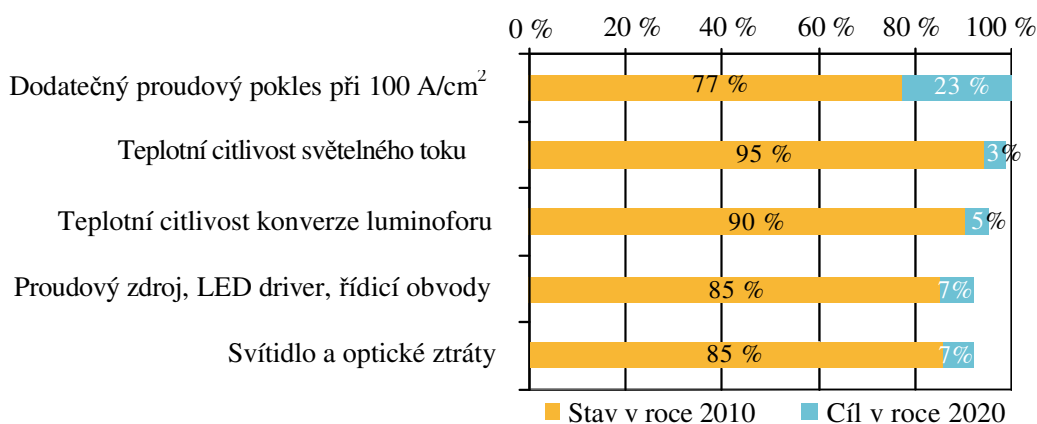
Se definuje jako poměr světelného toku vydávaného čipem při teplotní rovnováze za nepřetržitého provozu ve svítidle ku světelnému toku čipu při běžném měření ve výrobě při 25 °C. [50]



Obr. 4 Hodnoty účinnostních parametrů modrých LED čipů s luminoforem v roce 2010 a předpověď na rok 2020 [50], [51]

Pro každý parametr je uvedena jeho hodnota v roce 2010 a cíl v roce 2020. Referenční hodnota teploty je 25 °C, jmenovitá proudová hustota typických 35 A/cm², náhradní teplota chrom. $T_{cn} = 3000$ K a index barevného podání je stanoven na hodnotu $R_a = 85$. Různá řešení pro různé aplikace mohou pochopitelně nabývat jiných hodnot, rozdíly však nejsou velké. [51]

Jelikož konečná účinnost osvětlovací soustavy se světelnými diodami závisí i na konstrukci svítidla, je nutné zmínit také účinnosti příslušenství nutného pro provoz LED čipů. Je snahou minimalizovat další ztráty spojené s provozem LED v ustáleném stavu při teplotě a proudové hustotě, které mají smysl z ekonomického hlediska a životnosti. Obr. 5 podobně zobrazuje stav účinností dalších prvků osvětlovací soustavy s modrou diodou s luminoforem v roce 2010 a předpověď na rok 2020.



Obr. 5 Zdroje ztrát v příslušenství k modrým LED čipům s luminoforem v roce 2010 a předpověď na rok 2020 [51]

Odhady účinností LED čipu v kombinaci s účinností příslušenství umožňují zhodnocení celkové účinnosti LED svítidla. Pro případ modré LED s luminoforem je celková účinnost LED svítidla shrnuta v tab. 2.

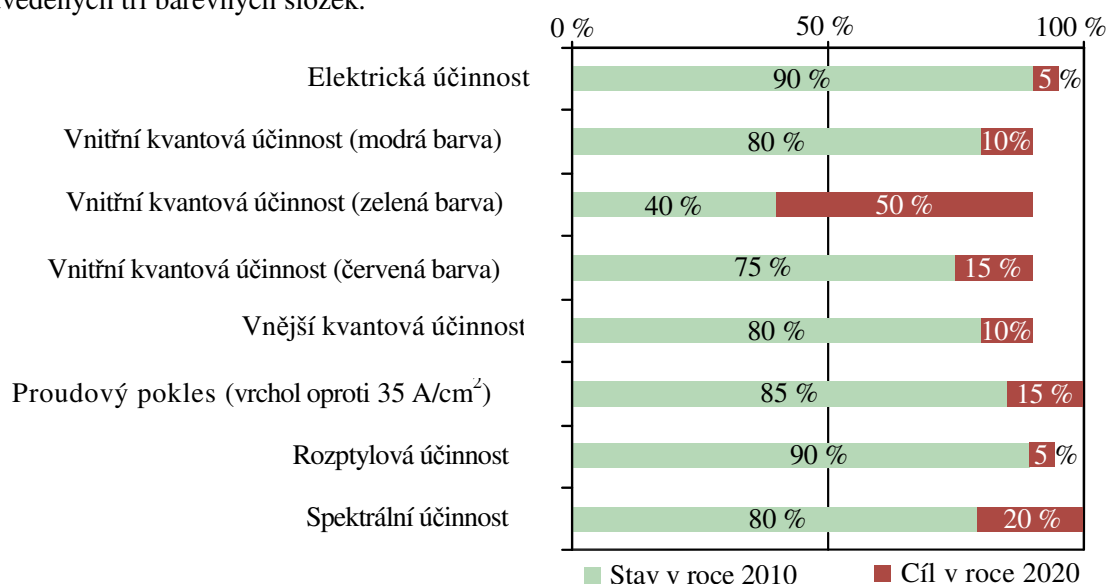
Tab. 2 Celková účinnost svítidel využívajících modrou LED s luminoforem [51]

Skupina účinnosti		Stav v roce 2010	Cíl v roce 2020
Účinnost konverze LED čipu	[%]	23	48
Spektrální účinnost	[%]	82	95
Celková účinnost LED čipu	[%]	27	53
Celkový měrný výkon LED čipu	[lm/W]	92	183
Celková účinnost LED svítidla	[%]	62	79
Celkový měrný výkon LED svítidla	[lm/W]	57	144

Ačkoliv není jisté, zda mohou být všechna navržená zlepšení skutečně realizována v sériově vyráběných světelných diodách, plnění těchto cílů naznačuje 17% potenciál pro zlepšení dnešních konvenčních svítidel (potlačením všech zdrojů ztrát lze dosáhnout odhadovaných 79% účinnosti v roce 2020). Tato celková účinnost LED svítidla závisí na přeměně elektrické energie ve světelnou, na spektrální účinnosti a na teoretické maximální hodnotě měrného výkonu, což je $\eta = 345 \text{ lm/W}$ pro tuto konkrétní předpověď. [51]

Světelné diody RGB

Podobnou analýzu účinnostních parametrů pro světelné diody RGB poskytuje obr. 6. U tohoto principu získávání bílého světla sice nevznikají ztráty konverzí modrého světla ve žluté prostřednictvím luminoforu, nicméně je třeba počítat se ztrátami v optice pro míšení uvedených tří barevných složek.

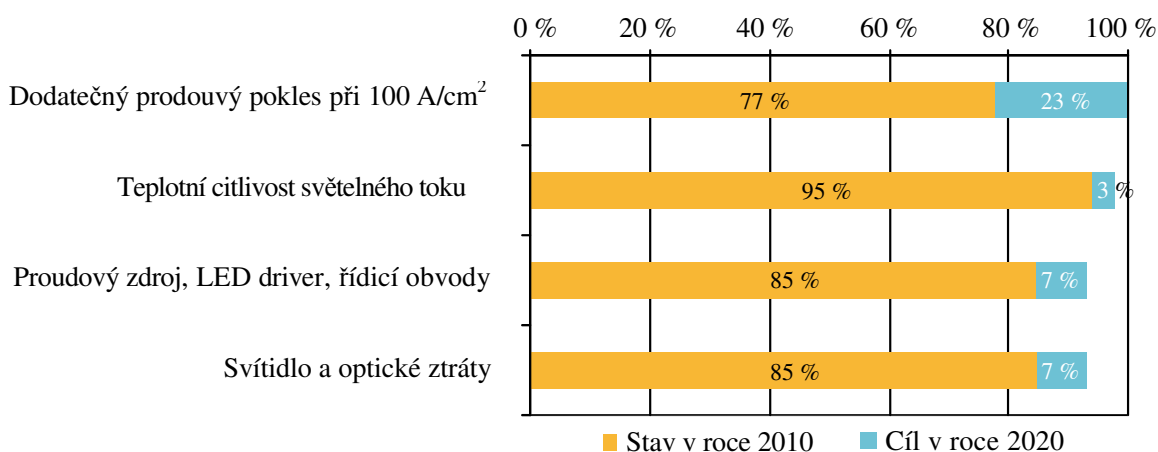


Obr. 6 Hodnoty účinnostních parametrů RGB LED čipů v r. 2010 a předpověď na r. 2020 [50], [51]

Předpověď uvažuje stejné charakteristické hodnoty jako v případě modré LED s luminoforem, tedy referenční hodnota teploty je 25 °C, jmenovitá proudová hustota 35 A/cm², náhradní teplota chromatičnosti $T_{cn} = 3000$ K a index barevného podání o hodnotě $R_a = 85$. U vnitřní kvantové účinnosti se počítá s vrcholy na vlnových délkách 610 nm pro červenou, 540 nm pro zelenou a 450 nm pro modrou. [51]

V dalších letech se očekává produkování čipů s nižší náhradní teplotou chromatičnosti a vyšším indexem barevného podání bez výraznějšího snížení účinnosti. Dosažení cílů z obr. 6 bude vyžadovat účinnější diody (zejména v zelené oblasti spektra) a další vylepšení v jejich příslušenství. Vnitřní kvantová účinnost se pohybuje v rozmezí od 40 % do 80 %, v závislosti na barvě. Konečným cílem je její zvýšení na 90 % v celém viditelném spektru. [51]

Obr. 7 ukazuje další zdroje ztrát v příslušenství světelných diod RGB. Díky absenci luminoforu odpadají ztráty jeho závislosti na teplotě.



Obr. 7 Zdroje ztrát v příslušenství k RGB LED čipům v roce 2010 a předpověď na r. 2020 [51]

Přehled o celkové účinnosti svítidel se světelnými diodami RGB poskytuje tab. 3. Současná účinnost tohoto typu diody je silně ovlivněna nízkou účinností zelené diody a nedostupností optimálních vlnových délek pro ostatní barvy. Na druhou stranu je potenciál světelné diody RGB vyšší (182 lm/W pro celé svítidlo) než u modré diody s luminoforem. [51]

Tab. 3 Celková účinnost svítidel využívajících světelné diody RGB [51]

Skupina účinnosti		Stav v roce 2010	Cíl v roce 2020
Účinnost konverze LED čipu	[%]	27	56
Spektrální účinnost	[%]	80	100
Celková účinnost LED čipu	[%]	22	56
Celkový měrný výkon LED čipu	[lm/W]	68	219
Celková účinnost LED svítidla	[%]	69	83
Celkový měrný výkon LED svítidla	[lm/W]	47	182

2 TEORIE VZNIKU SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ VE VÝKONOVÝCH SVĚTELNÝCH DIODÁCH

2.1 Fyzikální podstata vzniku záření v LED

Světelné záření je v LED generováno průchodem elektrického proudu jejím PN přechodem, což je spojení polovodičových materiálů s různými nevlastními typy vodivosti. Materiál typu N obsahuje nadbytek volných elektronů, tedy nosičů elektrického náboje. Druhý z polovodičových materiálů se vyznačuje dominancí kladně nabitých nosičů náboje, tzv. děr. Na jejich rozhraní dojde k zániku volných nosičů náboje, nepohyblivé ionty způsobí vznik elektrického pole, zabráňujícího průchodu zbylých volných nosičů. Vzniká tak energetická bariéra, nazývaná oblast prostorového náboje. [25]

U klasických usměrňovacích diod dochází po přiložení napětí k průchodu volných nosičů přes oblast prostorového náboje. V případě světelných diod je naopak snahou zajistit vzájemnou rekombinaci nosičů náboje právě v této oblasti a následný vznik světelného záření. [25]

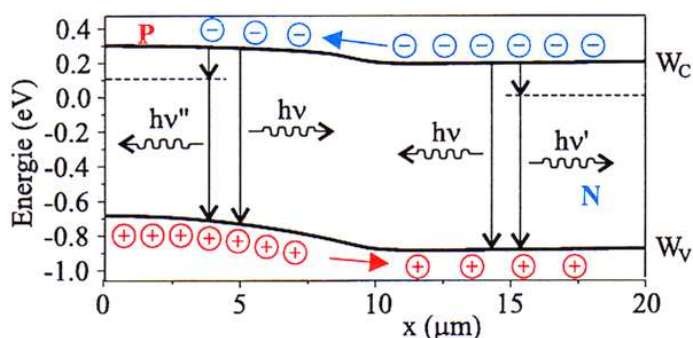
Rekombinace je jev, při kterém elektrony ztrácejí část své energie a ustupují na nižší oběžné dráhy v atomech. Při rekombinaci každé dvojice elektron-díra se uvolní určité množství energie, která se buďto vyzáří mimo polovodič nebo může být absorbována v krystalové mřížce, což se projeví zvýšením teploty polovodiče. Vlnová délka energie, vyzářené ve formě fotonu, je dána šířkou zakázaného pásu. Čím větší je energie, tím kratší je vlnová délka vyzářeného světelného paprsku. Výběrem vhodných polovodičových materiálů typu P a N a jejich dotováním příměsemi je tak možné stanovit vlnovou délku emitovaných fotonů. [kni ItNSBL]

Vlnovou délku λ vzniklého záření lze vyjádřit vztahem

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

kde c je rychlost světla a ν je frekvence záření. [25]

Princip elektroluminiscence popisuje obr. 8



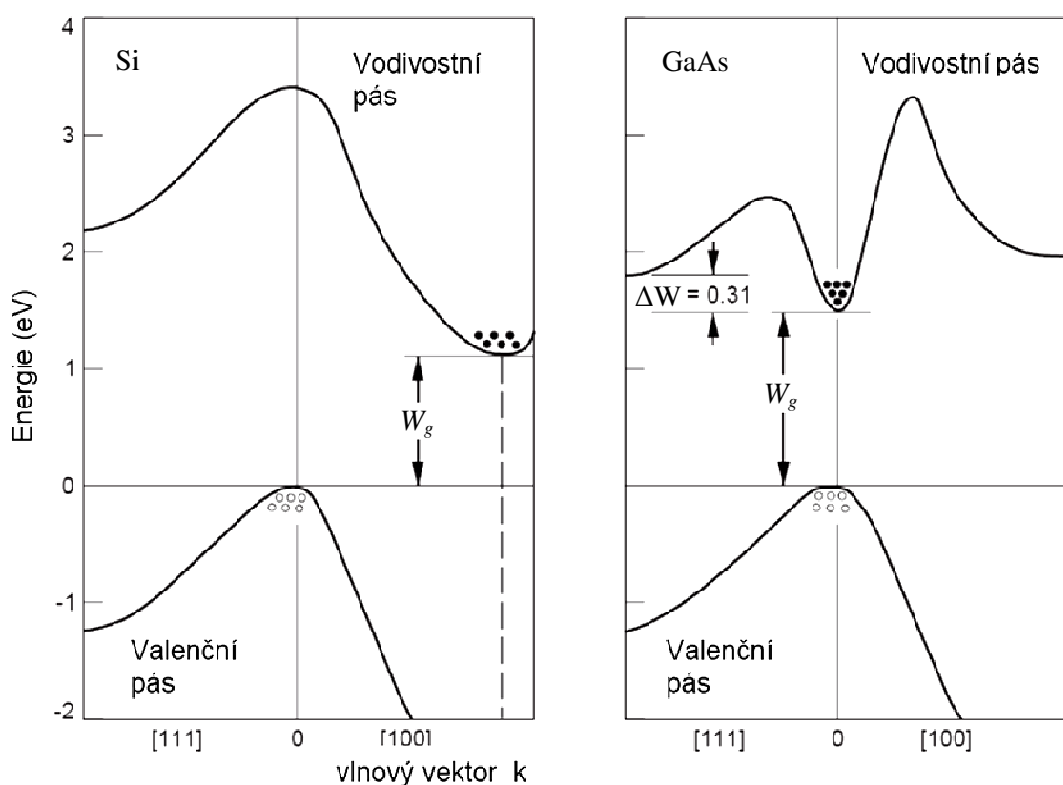
Obr. 8 Vznik elektroluminiscence v PN přechodu [25]

Průchodem elektrického proudu v propustném směru se energie elektronu při mezipásové rekombinaci (W_v – valenční pás, W_c – vodivostní pás) uvolňuje ve formě fotonu o energii

$$W = h \cdot \nu \quad (2)$$

kde h je Planckova konstanta. Také prostřednictvím příměsových hladin v zakázaném pásu může dojít k přechodu. Emitované záření pak vykazuje nižší energii $h\nu'$. [25]

Pro úplné vysvětlení tohoto jevu je třeba na obr. 8 pohlédnout v kolmém směru, neboli z hlediska závislosti energie valenčního a vodivostního pásu na vlnovém vektoru k (obr. 9). [25]



Obr. 9 Energetický pásový diagram nepřímého polovodiče (Si) a přímého polovodiče (GaAs) při teplotě 300 K [25]

Z obr. 9 (E-k diagram) lze definovat přímé polovodiče, mající vrchol valenčního pásu a sedlo vodivostního pásu proti sobě, např. GaAs. U tohoto typu polovodičů je pravděpodobnost zářivé rekombinace o mnoho řádů vyšší, na rozdíl od nepřímých polovodičů, kde by byla pro rekombinaci nutná navíc účast fononů. [25]

Vlnová délka emitovaného záření závisí na energii zakázaného pásma W_g . V křemíkových a germaniových usměrňovacích diodách rekombinují elektrony a díry ve světlo nevyzařující přeměně, neboť se jedná o materiály s nepřímým zakázaným pásmem. Materiály použité

ve světelných diodách mají přímý zakázaný pás s energiemi odpovídajícími ultrafialové, viditelné nebo infračervené oblasti. Nejčastěji používanými materiály jsou sloučeniny prvků III. a V. skupiny periodické soustavy jako GaP, GaAsP, GaAlAs, AlInGaP pro zelené a červené diody a SiC, GaN, InGaN v případě modrých a bílých diod. [2]

Typy PN přechodu

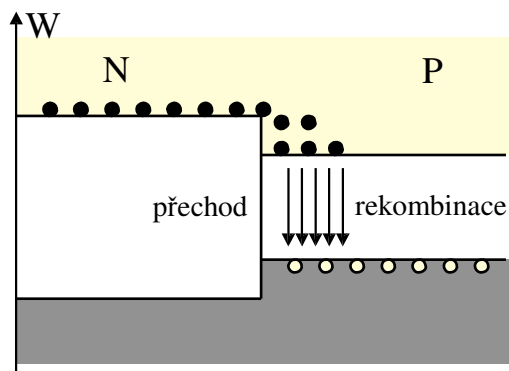
Podle konstrukce se PN přechod rozlišuje na dva základní druhy.

Homogenní přechod

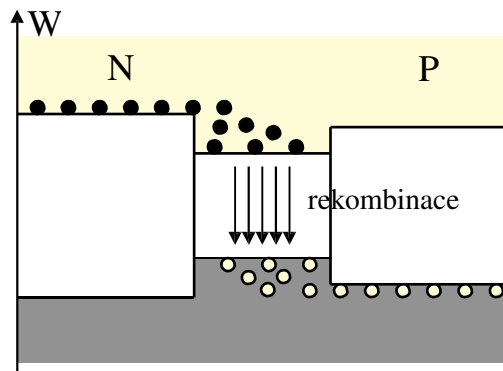
Tento jednoduchý typ je realizován uvnitř jednoho monokrystalu na obou stranách dotovaného příměsí P a N. V energetickém pásovém diagramu je šířka zakázaného pásu na obou stranách PN přechodu stejná. [46]

Heterogenní přechod

Vzniká spojením dvou různých polovodičů. K rekombinaci dochází mezi silně dotovanými polovodičovými vrstvami, přesněji ve velmi úzké aktivní vrstvě, čímž se dosahuje vyšší intenzity světelného záření (obr. 10a). Struktura dvou vrstev s uvedenými vlastnostmi se označuje jako dvojitý heterogenní přechod (obr. 10b). V energetickém pásovém diagramu je šířka zakázaného pásu na obou stranách PN přechodu různá. [46]



Obr. 10a Princip jednoduchého heteropřechodu [46]

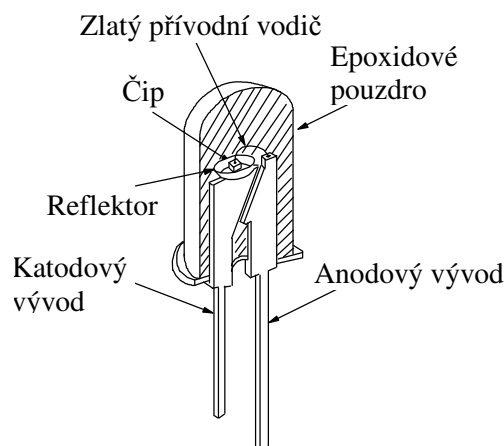


Obr. 10b Princip dvojitého heteropřechodu [46]

2.2 Základní konstrukční provedení LED

2.2.1 Indikátorová LED

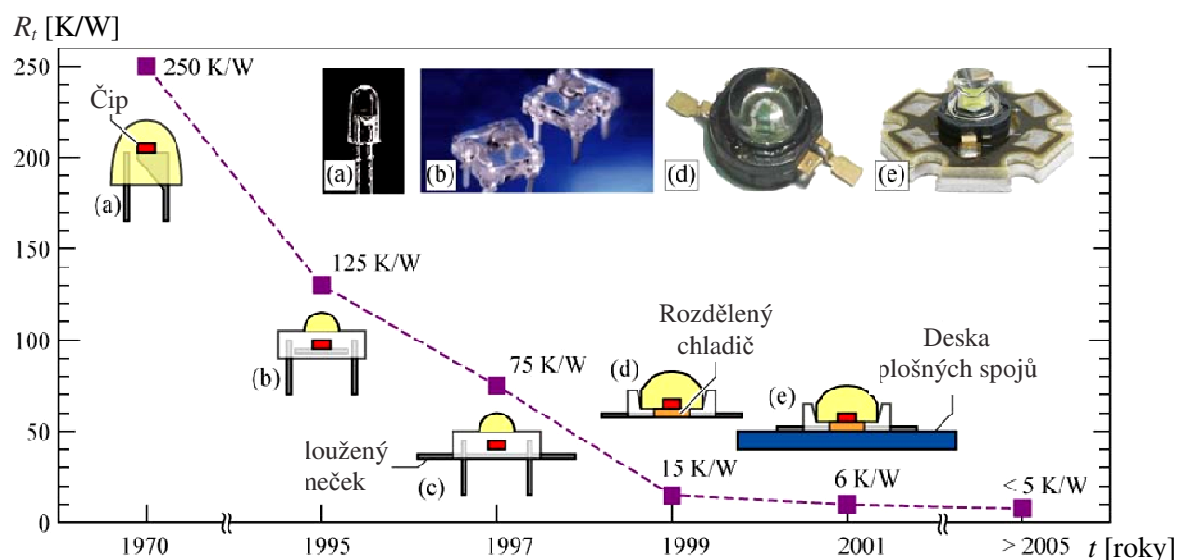
Standardní provedení světelné diody o průměru 5 mm, kde anoda, katoda a polovodičový čip jsou zality v epoxidovém pouzdru, jak ukazuje obr. 11, bylo mnoho let téměř nezměněno. Této konstrukce se stále využívá v aplikacích, kde není požadován vysoký světelný tok, typicky jako indikátory stavů.



Obr. 11 Řez 5mm indikátorovou LED [32]

S cílem využití LED jako zdroje pro osvětlování bylo nutné zvýšit její světelný tok. Původní indikátorové provedení bylo navrženo pro nízký příkon, který omezoval další navyšování jejich svítivosti. Další nárůst teploty polovodičového přechodu neumožňoval dostatečné odvádění tepla jejími vývody, což v důsledku znamenalo rapidní zkrácení životnosti.

Pro zachování životnosti a navýšení získaného světelného toku bylo třeba upravit jejich strukturu. Nová konstrukce musela dosáhnout nižšího tepelného odporu mezi čipem a pouzdem diody. Vývoj tepelného odporu a ukázky pouzder svítivých diod znázorňuje obr. 12.

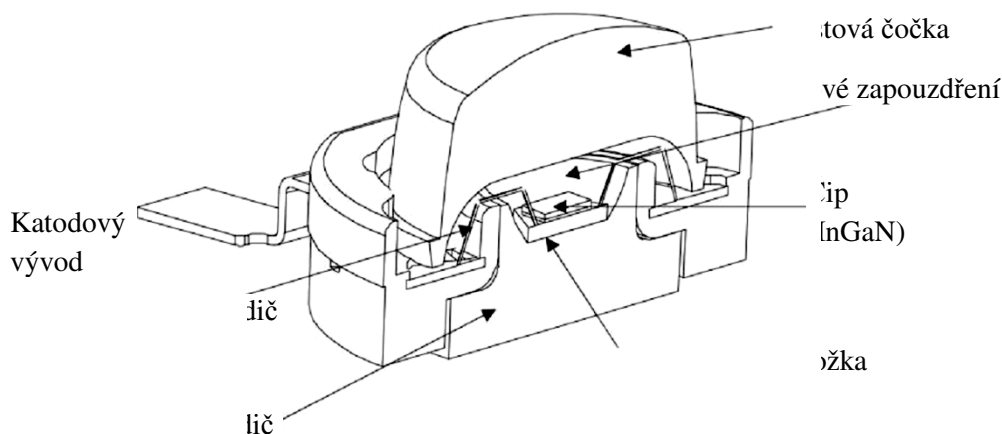


Obr. 12 Vývoj tepelného odporu pouzder LED [3]

Provedení pouzder jsou následující: (a) 5mm, (b) nízkoprofilové, (c) nízkoprofilové s prodlouženým rámečkem, (d) s rozděleným chladičem, (e) s chladičem na desce plošných spojů. Obchodní názvy pouzder: „Piranha“ (b a c, Hewlett Packard Corp.), „Barracuda“ (d a e, Lumileds Corp.), „Dragon“ (d a e, Osram Opto Semiconductors Corp.) [3]

2.2.2 Výkonová LED

Nejčastěji vyráběná koncepce pouzdra výkonové světelné diody je popsána na obr. 13, kde je nejzásadnějším prvkem k eliminaci vysokého tepelného odporu chladič doléhající na čip přes křemíkovou podložku. Praktická provedení výkonových světelných diod se samozřejmě liší podle jednotlivých výrobců, základní znaky však zůstávají zachovány.



Obr. 13 Konstrukční řešení 1W výkonové modré LED s luminoforem [45]

2.3 Vliv teploty na parametry LED

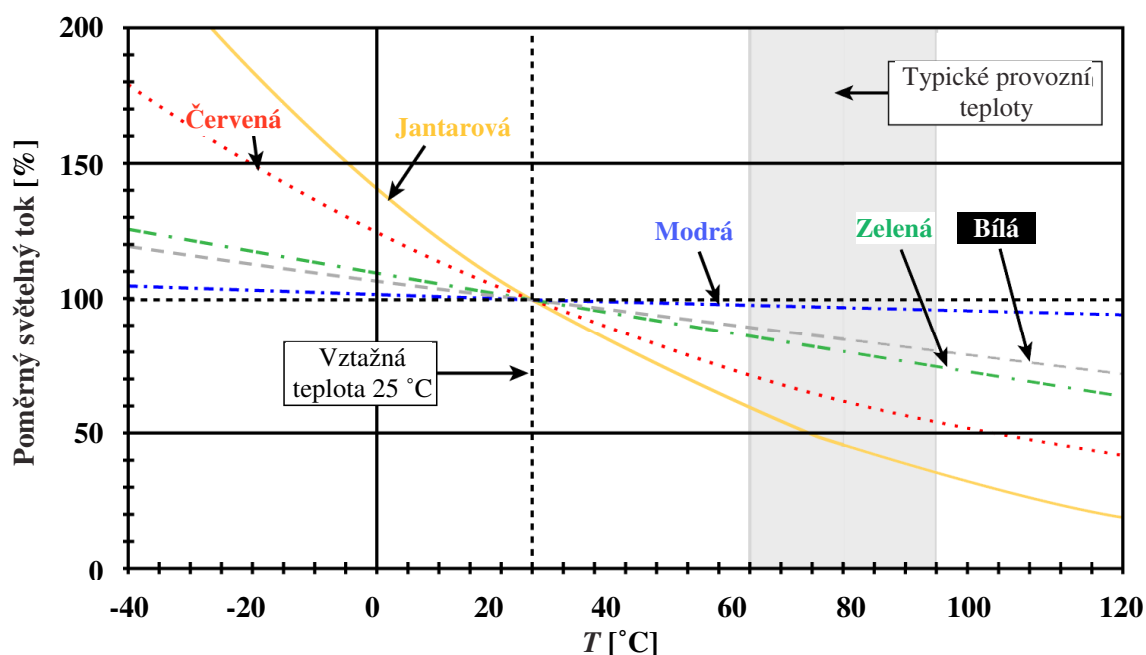
Většina případů poškození světelných diod je způsobena špatným odvodem tepla z polovodičového čipu. Zvýšená teplota PN přechodu způsobuje snížení světelného toku diody, změnu barvy generovaného záření a urychluje degradaci samotného čipu.

Teplotu PN přechodu ovlivňují především tři parametry:

- jmenovitý proud diody,
- tepelný odpor mezi PN přechodem a vnějším okolím,
- okolní teplota.

2.3.1 Závislost světelného toku LED na teplotě

Světelný tok LED různých barev reaguje odlišně na změnu teploty. Jak ukazuje obr. 14, diody generující jantarovou a červenou barvu jsou na změnu nejcitlivější, modré nejméně.



Obr. 14 Závislost poměrného světelného toku různých typů LED na teplotě PN přechodu [27]

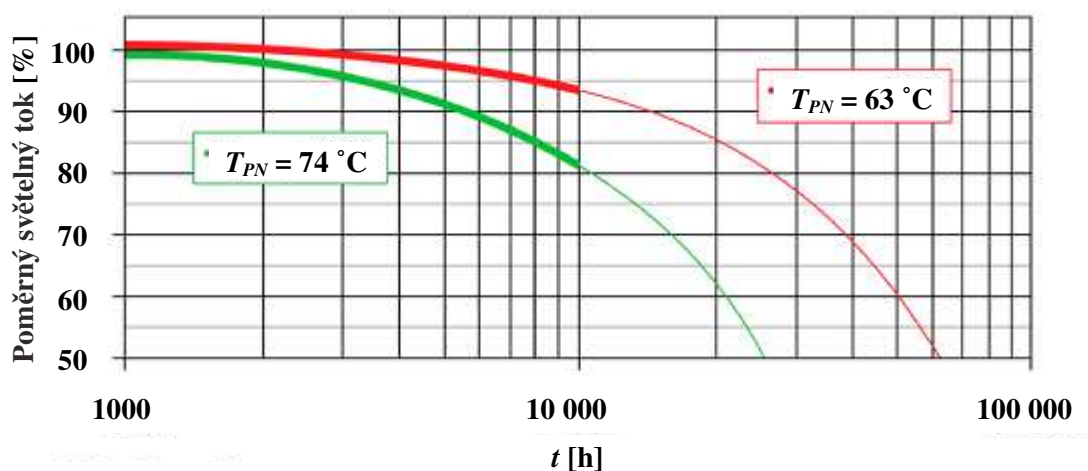
Tato teplotní reakce může mít za následek výrazné změny barvy generované ve světelných diodách RGB, pokud se teplota přechodu odlišuje od své navržené hodnoty. Výrobci světelných diod stanovují parametry svých výrobků při okolní teplotě 25 °C. Při provozu v prostředí o této teplotě vzduchu však teplota čipu dosahuje obvykle 60 °C a více. Proto bílé světelné diody budou poskytovat alespoň o 10 % méně světelného toku, než výrobce udává. Snížení světelného toku u výrobků s nedostatečným tepelným návrhem může být značně vyšší. [27]

2.3.2 Doba života LED

Nepřetržitý provoz při zvýšené teplotě zrychluje pokles světelného toku diody a vede ke zkrácení doby života. Obr. 15 ukazuje příklad průběhů poměrného světelného toku v čase. Křivky byly sestaveny na základě měření po dobu prvních 10 000 hodin života dvou identických světelných diod při stejném proudu, ale s udržovaným rozdílem 11 °C v teplotách PN přechodu. Extrapolací odhadnutá doba života, typicky definovaná na 70 % počátečního světelného toku, se snížila z přibližných 37 000 hodin na 16 000 hodin, což znamená 57% zkrácení. [27]

Hodnota právě 70 % z počátečního světelného toku je stanovena na základě pozorování, která ukázala, že člověk nerozpozná pokles nižší než 30 %. Uvedená úroveň je obvykle vztažena k 50% intervalu spolehlivosti, resp. se předpokládá nejméně 70 % počátečního světelného toku u poloviny diod po dosažení plánovaného počtu provozních hodin. [28]

Vedle zvýšené teploty mohou mít na snížení světelného toku nebo úplného selhání vliv následující faktory – kolísání napětí nebo proudu, selhání driveru nebo jiných komponentů, znehodnocení vyplňovacího materiálu, vnikání vlhkosti, degradace luminoforu atp. [27]



Obr. 15 Příklad průběhu poměrného svět. toku diod v čase při různých teplotách přechodu [27]

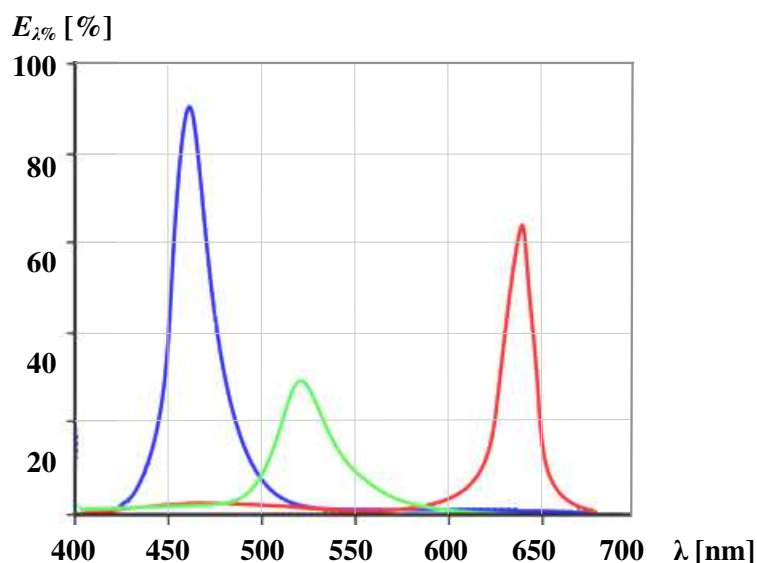
2.4 Druhy bílých světelných diod

Světelné diody se základním chemickým složením PN přechodu nejsou zdroji bílého světla. Generují záření v úzkém rozsahu vlnových délek viditelného spektra, což je důvodem jejich vysoké účinnosti v signálních aplikacích. Pro potřeby osvětlování je však nutné jejich spektrální složení doplnit tak, aby výsledné záření vzbuzovalo vjem bílého světla. Využívá se dvou základních principů uvedených dále.

2.4.1 Světelná dioda RGB

Prvním, méně užívaným, způsobem je použití tří samostatných čipů základních barev: *Red* (červená), *Green* (zelená) a *Blue* (modrá). Smíšením jejich záření v prostoru s určitou koloritou povrchů, které osvětlují, se vytváří dojem bílého světla. Změnou poměrné intenzity jednotlivých barevných složek lze snadno nastavit barevný odstín pro různé aplikace.

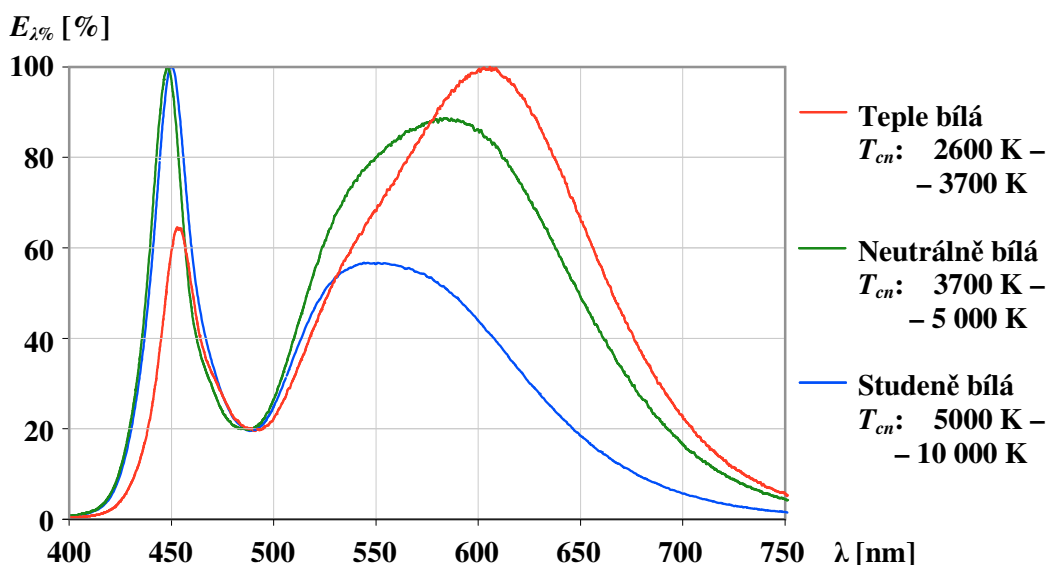
Typická spektra základních barevných složek světelné diody RGB znázorňuje obr. 16. Tento vztah poměrné spektrální zářivosti na vlnové délce popisuje skutečnosti uvedené v kapitole 1.4.4. Účinnost světelné diody RGB jako celku je negativně ovlivněna nízkou vnitřní kvantovou účinností zeleného čipu, čemuž v obr. 16 odpovídá nejnižší vrchol poměrné spektrální zářivosti. Hodnoty vnitřní kvantové účinnosti z obr. 6 v kapitole 1.4.4 pro modrou a červenou barvu taktéž dokládají nejvyšší dosahovanou účinnost modré barevné složky (analogicky v obr. 16).



Obr. 16 Spektra záření jednotlivých barevných složek diody RGB [47]

2.4.2 Modrá světelná dioda s luminoforem

Vysoká účinnost modré světelné diody je předurčujícím faktorem pro její využití k vytvoření bílého záření. Část záření modré diody je přenášena k pozorovateli (záření vzniklé luminiscencí) a část je v prostoru zapouzdření čipu absorbována a následně emitována zářením o delších vlnových délkách ve žlutém spektru (fosforecence). K převodu záření na delší vlnové délky se používají nejčastěji sloučeniny fosforu a látky o chemickém složení $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ s dotací ceru jako opticky aktivního prvku. Výsledná spektra záření o různých náhradních teplotách chromatičnosti modré diody s luminoforem ukazuje obr. 17. [4]



Obr. 17 Spektrum modré diody s luminoforem o různých náhr. teplotách chromatičnosti [44]

Náhradní teplota chromatičnosti T_{cn}

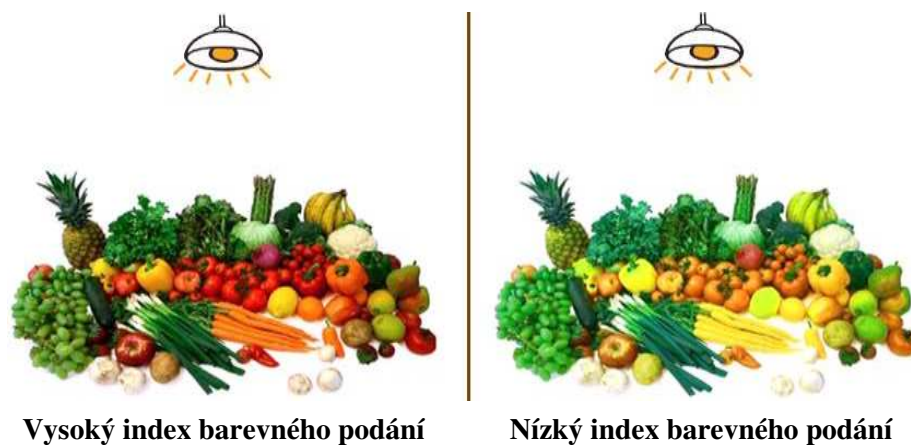
Základní parametr vyjadřující barevné vlastnosti světla je teplota chromatičnosti. U teplotních světelných zdrojů (typickým představitelem je žárovka) odpovídá teplotě vlákna. Pro popis barvy záření výbojových a luminiscenčních světelných zdrojů se zavádí termín náhradní teplota chromatičnosti – ta odpovídá ekvivalentnímu teplotnímu zdroji s podobným spektrálním složením, jako má daný světelný zdroj. Ukázka vlivu různých teplot chromatičnosti na osvětlovaný předmět je na obr. 18.



Obr. 18 Efekt teploty chromatičnosti světelného zdroje na osvětlovaný předmět [20]

Index barevného podání R_a

Různé druhy světelných zdrojů mohou mít stejnou barvu světla, ale vykazovat různé podání barev závisující na spektrálním složení záření těchto zdrojů. Hlavním znakem kvality vyzařovaného světla se tak stává index barevného podání R_a . Udává míru schopnosti záření daného zdroje podat věrně barvy. Určuje se průměrováním indexů podání určitých barevných vzorků a podle druhu světelného zdroje může nabývat hodnot od 0 do 100. Ve většině vnitřních prostorů je požadován $R_a > 80$. U světelných diod platí přímá úměra mezi náhradní teplotou chromatičnosti a její účinností, index barevného podání je těmito dvěma parametry nepřímo úměrný. Kvalita podání barev při osvětlování světelnými zdroji s vysokým a nízkým indexem barevného podání je patrná z obr. 19.



Obr. 19 Osvětlení předmětů světelným zdrojem s vysokým R_a a nízkým R_a [43]

2.4.3 Srovnání principů tvorby bílé barvy v LED

Oba základní principy vytváření bílého světla LED diodami mají jisté výhody i nevýhody. Klíčovými faktory jsou index barevného podání, vyzářený světelný tok, měrný výkon a výrobní náklady. Výhody a nevýhody RGB diod a modrých světelných diod s luminoforem při současné úrovni vývoje shrnuje tab. 4.

Tab. 4 Výhody a nevýhody diod RGB a modrých diod s luminoforem [23]

Technologie	Výhody	Nevýhody
Světelná dioda RGB	<ul style="list-style-type: none">– Vysoká barevná variabilita– Výborné barevné podání	<ul style="list-style-type: none">– Rozdílná citlivost jednotlivých barevných čipů na proud, teplotu a stárí– Přidružené náklady na řídicí obvody
Modrá světelná dioda s luminoforem	<ul style="list-style-type: none">– Rozšířenější technologie– Velkosériová výroba– Poměrně vyšší světelný tok– Poměrně vyšší měrný výkon– Poměrně nižší náklady	<ul style="list-style-type: none">– Vysoká náhradní teplota chromatičnosti (modrý tón)– Malá dostupnost nižších náhradních teplot chromatičnosti– Možný nežádoucí posun náhradní teploty chromatičnosti

Obecně platí, že rozšířenější modré diody s luminoforem mají vyšší měrný výkon, ale nižší index barevného podání. Zlepšení tohoto parametru se v současnosti dociluje zvýšením podílu záření v dlouhovlnné části viditelného spektra, což má ovšem za následek snížení světelné účinnosti a měrného výkonu diody.

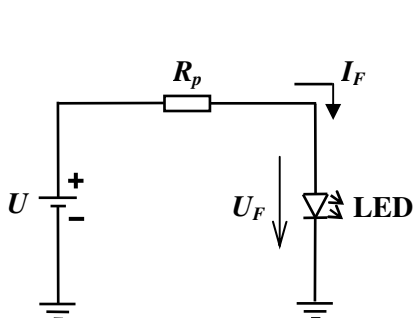
Další zvýšení indexu barevného podání se očekává od nové technologie společnosti Mitsubishi Chemical, která prodává světelné diody pod obchodní značkou Verbatim. Během roku 2011 se dostanou na trh diody s čipem emitujícím záření fialové barvy, doplněným o červený, zelený a modrý fosfor. Index barevného podání této diody se udává až 98. [24]

3 NAPÁJENÍ VÝKONOVÝCH SVĚTELNÝCH DIOD SE ZAMĚŘENÍM NA STMÍVÁNÍ (PŘEDŘADNÍKY)

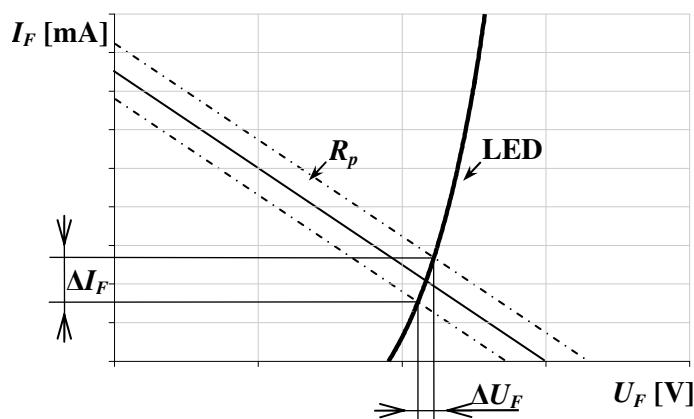
3.1 Princip řízení světelného toku LED

3.1.1 Voltampérová charakteristika LED

Velikost světelného toku vyzařovaného světelnou diodou lze řídit zejména velikostí proudu. Možností řídit tok diody velikostí přiloženého napětí se běžně nevyužívá, neboť by při malé změně napětí došlo k velké změně proudu. Tuto skutečnost názorně popisuje voltampérová charakteristika světelné diody na obr. 20b, která má stejný průběh jako u běžné usměrňovací diody. Naopak z pohledu změny proudu se napětí jeví jako téměř konstantní. Toto je důvod, proč se pro řízení toku světelné diody používá proudový zdroj. Vzhledem k usměrňovacím vlastnostem přechodu PN a uvedeným závěrům je zřejmé, že řízení střídavým proudem je velmi neefektivní, protože proud prochází diodou pouze po dobu trvání jedné půlperiody.



Obr. 20a Základní schéma zapojení světelné diody

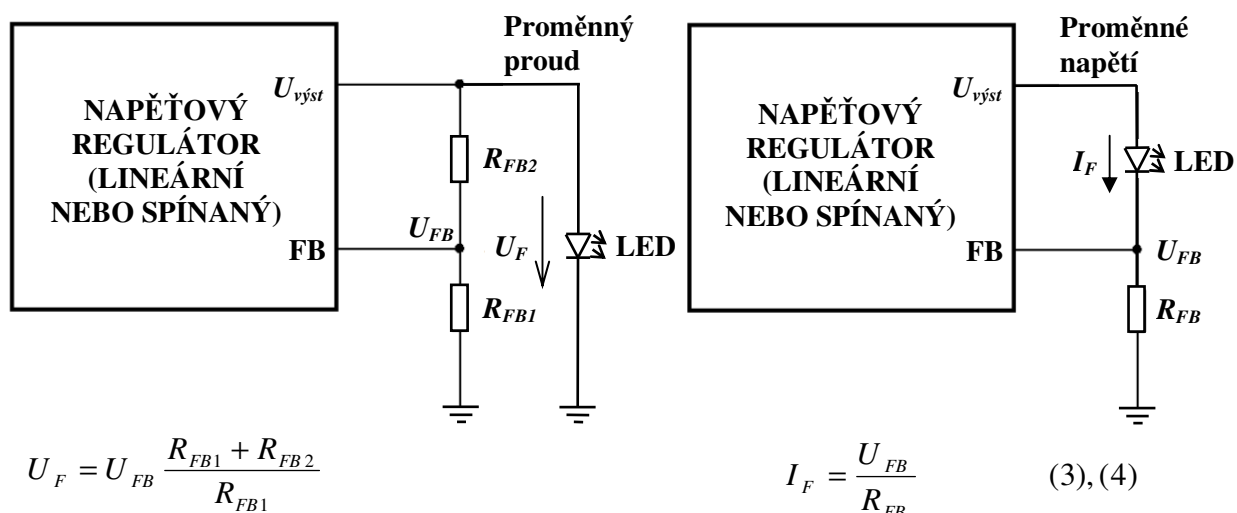


Obr. 20b Obecná voltampérová charakteristika světelné diody v propustném směru

3.1.2 Funkce proudového zdroje

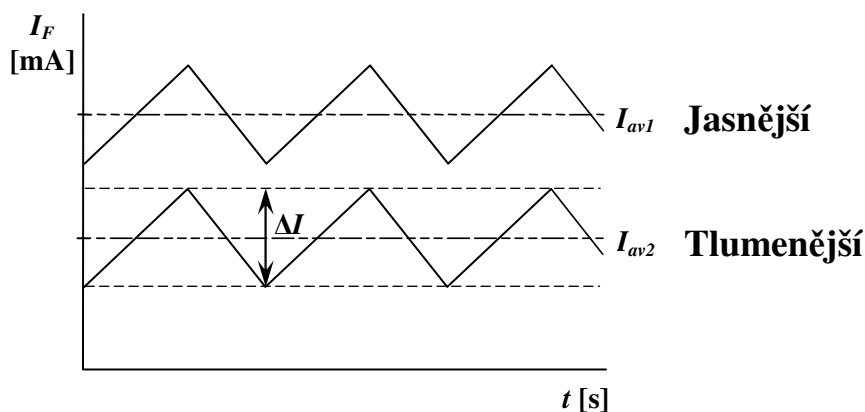
Nejjednodušší zapojení zdroje konstantního proudu využívá předřadného odporu (obr. 20a). Toto řešení je dostačující v nenáročných aplikacích, avšak není schopné zajistit stálý proud zátěží, pokud se změní napětí zdroje nebo zátěže. Využití tohoto zapojení je omezené také kvůli množství energie zmařeném v teplo.

Vedle omezení nevýhod předřadného odporu vyžadují dnešní aplikace nastavitelný proud procházející světelnou diodou. Tento požadavek lze splnit prostřednictvím spínaného zdroje napětí s výstupem uzpůsobeným pro převod nastaveného konstantního výstupního napětí na konstantní proud (obr. 21).



Obr. 21 Zapojení výstupu napěťového regulátoru pro převod z konstantního výstupního napětí na konstantní výstupní proud [37]

Světelnou diodou zapojenou za spínaným zdrojem prochází zvlněný proud (obr. 22). Úroveň střední hodnoty proudu diodou určuje přímo úměrně její svítivost. Lidské oko není schopné zachytit pokles svítivosti nižší než 20 %, podobně se projevuje setrvačnost oka při frekvencích vyšších než 25 Hz. [37]



Obr. 22 Zvlněný průběh proudu procházejícího LED [37]

Důvody použití spínaného zdroje pro řízení LED

Charakteristickou odlišností spínaného zdroje od zdroje se spojitou regulací je způsob využívání pracovního cyklu výkonového regulačního členu. Ve spínaném zdroji je výkonový člen využíván pulzně, resp. střídavě spínán a rozpínán podle přivedených pulzů. Výhodou je vyšší odebíraný pulzní výkon daného výkonového prvku, než jaký by bylo možno odebírat ve spojitém režimu, kdy by prvek byl zatěžován kontinuálně. [41]

Další výhodou při využití spínaného zdroje je snadnost jeho řízení, potažmo stmívání diod. Za účelem získání vyšší rozlišovací schopnosti řízení bylo nutné dosáhnout vyšších pracovních frekvencí. Vyvstal tak požadavek na nasazení rychlých polovodičových spínacích součástek, kondenzátorů vysokých kapacit a silných tlumivek. Zároveň je snahou jejich miniaturizace a zpřesnění regulace výstupního napětí nebo proudu. [41]

V dnešní době je řídicí obvod dodáván v integrované formě, což usnadňuje následný návrh celého zdroje. K tomuto obvodu se připojí několik málo dalších součástek a pulzní zdroj je dokončen. V případě výkonových světelných diod vytváří řídicí obvod spolu s okolními součástkami tzv. budič výkonových světelných diod. Tento celek umožňuje použití různých topologií spínaných zdrojů. [41]

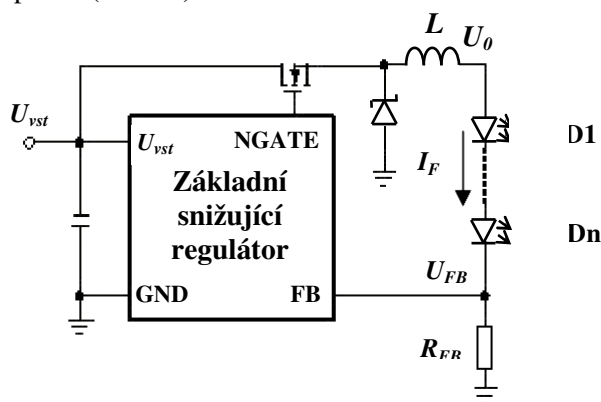
3.2 Topologie budičů výkonových LED

Běžně používané lineární regulátory nabízejí relativně přesné řízení proudu procházejícího světelnou diodou. Nicméně mnohé aplikace vyžadují široký vstupní rozsah při vysokých proudech, kde lineární regulátory vykazují vysoké ztráty, z toho vyplývající nízkou účinnost (přibližně 30 % při $U_{vst} = 12 \text{ V}$ a $I_{výst} = 1 \text{ A}$ v případě InGaN diody). Na snadě je nasazení topologií spínaných zdrojů založených na spínání výkonového prvku, umožňujících řídit hodnotu výstupního proudu pomocí střídý pulzů. Na výstupu je získáno pulzující napětí a proud, odpadají tak nevýhody lineárních regulátorů; účinnost je u uvedeného příkladu 97 %. [38]

Budiče výkonových světelných diod sestávají z řídicího obvodu, realizujícího řídicí pulzy pro výkonovou součástku podle porovnání skutečné a žádané výstupní hodnoty, a ze zapojení přidružených součástek. Pro potřeby světelné techniky se využívají především topologie s neizolovaným zapojením, mezi které patří konfigurace buck, boost, buck-boost a SEPIC. [38]

3.2.1 Topologie buck

Stejně jako všechny následující topologie, i tato snižující vychází z napěťového regulátoru s výstupem převedeným na proud (obr. 23).



Obr. 23 Schéma budiče LED topologie buck [38]

Uvedené schéma obsahuje indukčnost, určující mezivrcholové zvlnění proudu. Proud procházející diodami je v této snižující topologii shodný se střední hodnotou zvlněného proudu indukčnosti. Proto lze nastavit proud světelných diod hodnotou zvlněného proudu cívkou, což významně usnadňuje převod zdroje konstantního napětí na zdroj konstantního proudu. [38]

Nastavení hodnoty proudu cívkou se dosáhne v této topologii úpravou pracovního cyklu nebo spínací frekvence. Hodnota proudu procházejícího diodami je pak definována vztahem (4).

Tento proud je třeba nadále snímat, nejsnadněji odporem, přičemž na něm vznikají velké ztráty. Jejich snížení umožňuje zpětná napěťová vazba U_{FB} , protože se sníží hodnoty odporů při stejném proudu I_F . Běžně používané LED budiče mají referenční napětí U_{FB} v rozsahu 50 mV až 200 mV. [38]

Topologie buck jako jediná neobsahuje na svém výstupu kapacitu, což má dvě výhody. Výstupní impedance měniče je výrazně vyšší a při velkých změnách výst. napětí je zachován téměř konstantní proud. Důsledkem je významné zvýšení šířky a rychlosti stmívání. [38]

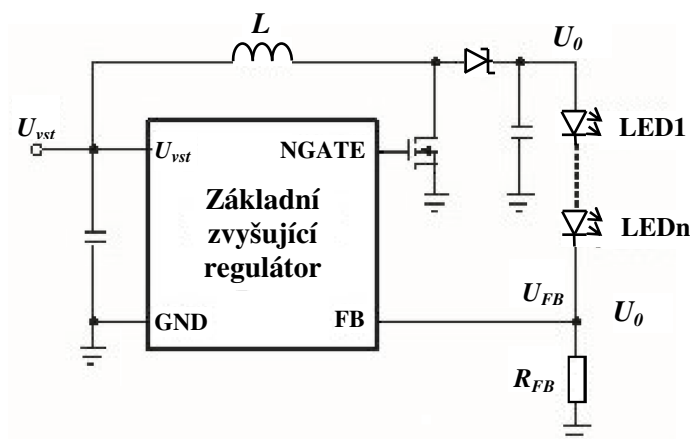
Nevýhodou absence výstupního kondenzátoru je nutnost užití vyšší indukčnosti k filtraci zvlněného proudu na hodnoty v rozsahu od 5 % do 20 % stejnosměrného proudu diody. Při stejném vstupním proudu se tak musí použít větší hodnoty indukčnosti, což s sebou nese větší rozměry budiče a nárůst ceny. Proto se volí kompromis pro konkrétní aplikaci. [38]

LED budič v topologii buck se nasazuje v aplikacích s malým počtem světelných diod a v zařízeních na napětí 12 V střídavých, resp. 12 V a 24 V stejnosměrných. Osvětlovací soustavy s vyšším počtem světelných diod pro dosažení odpovídajícího světelného toku pracovat při vyšším napětí. LED budiče snižující topologie nemohou být v těchto soustavách použity z principu jejich funkce (na jejich výstupu je vždy nižší napětí než na vstupu); tady se uplatňují LED budiče zvyšující topologie. [39]

3.2.2 Topologie boost

Tato základní zvyšující topologie vytváří na svém výstupu vyšší napětí než je napětí vstupní. Střední hodnota proudu cívkou se rovná součinu proudu diody a poměru $1/(1-D)$, kde D je střída. Střída je ovlivňována proměnným výstupním napětím a proudem cívkou. Pro zamezení saturace cívky musí být určena špičková a maximální střední hodnota proudu. [39]

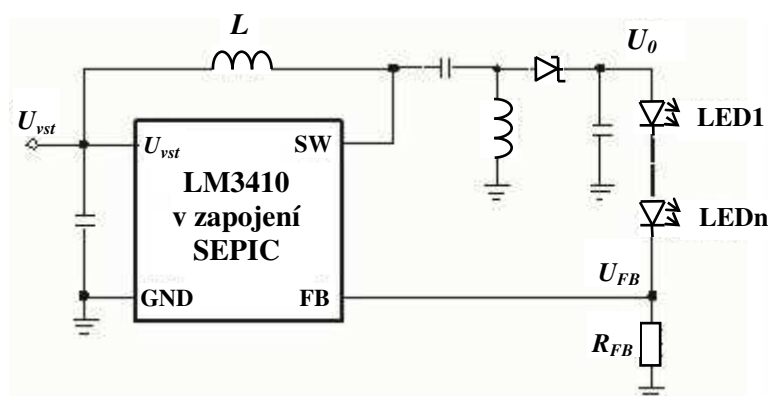
Oproti snižující topologii s výstupní cívkou má zvyšující topologie na svém výstupu nespojitý proud. Na výstup se tedy zařazuje kondenzátor udržující výstupní napětí a spojitý proud. Funkcí výstupního kondenzátoru v napěťovém regulátoru je filtrace a udržení výstupního napětí při předchozích zatíženích, kdežto v proudovém regulátoru slouží pouze k filtraci zvlnění proudu. Kapacita kondenzátoru by měla být co nejnižší k udržení požadovaného zvlnění výstupního proudu budiče a následně i zlepšení odezvy diody na stmívání (obr. 24). [39]



Obr. 24 Základní schéma LED budiče se zvyšující topologií [39]

3.2.3 Topologie SEPIC

Často používanou topologií v zapojení výkonových diod je SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter). Základní zapojení v této topologii je na obr. 25.



Obr. 25 Základní zapojení LED budiče topologie SEPIC [39]

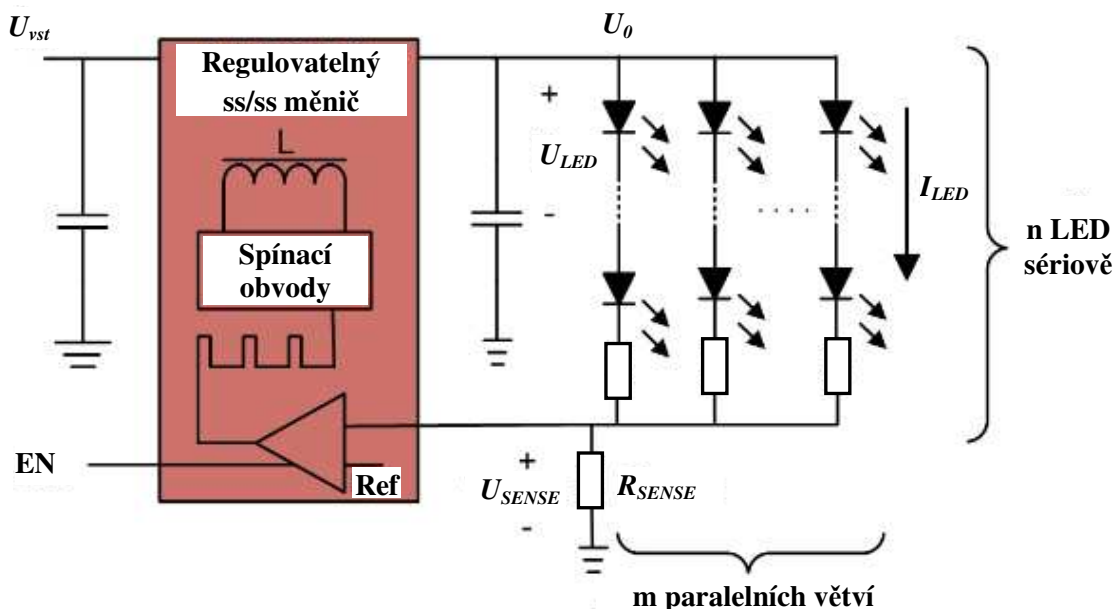
LED budič v této topologii se vyznačuje shodností výstupní polarity se vstupní a spojitým vstupním proudem kvůli vstupní cívce. Stejně jako topologie boost vyžaduje i topologie SEPIC výstupní kondenzátor k udržení nezvlněného proudu diodou. Další výhodou této topologie je možnost sestavit téměř každý driver v této topologii bez nutnosti obrácení polarity nebo nasazení obvodů pro zesílení signálu. [39]

3.3 Topologie zapojení vyššího počtu světelných diod

Stmívání vyššího počtu světelných diod je možné realizovat dvěma způsoby. Jednoduché sériové zapojení diod je však nepoužitelné se zvyšujícím se počtem diod kvůli nutnosti jejich napájení vyšším napětím. Proto se využívají dva druhy sérioparalelního zapojení. [22]

3.3.1 Společné nastavení proudů ve větvích

Každý regulovatelný měnič ss/ss lze snadno použít jako zdroj konstantního proudu pro řízení vyššího počtu diod zapojených sériově. Schematicky je takové zapojení zobrazeno na obr. 26. [22]

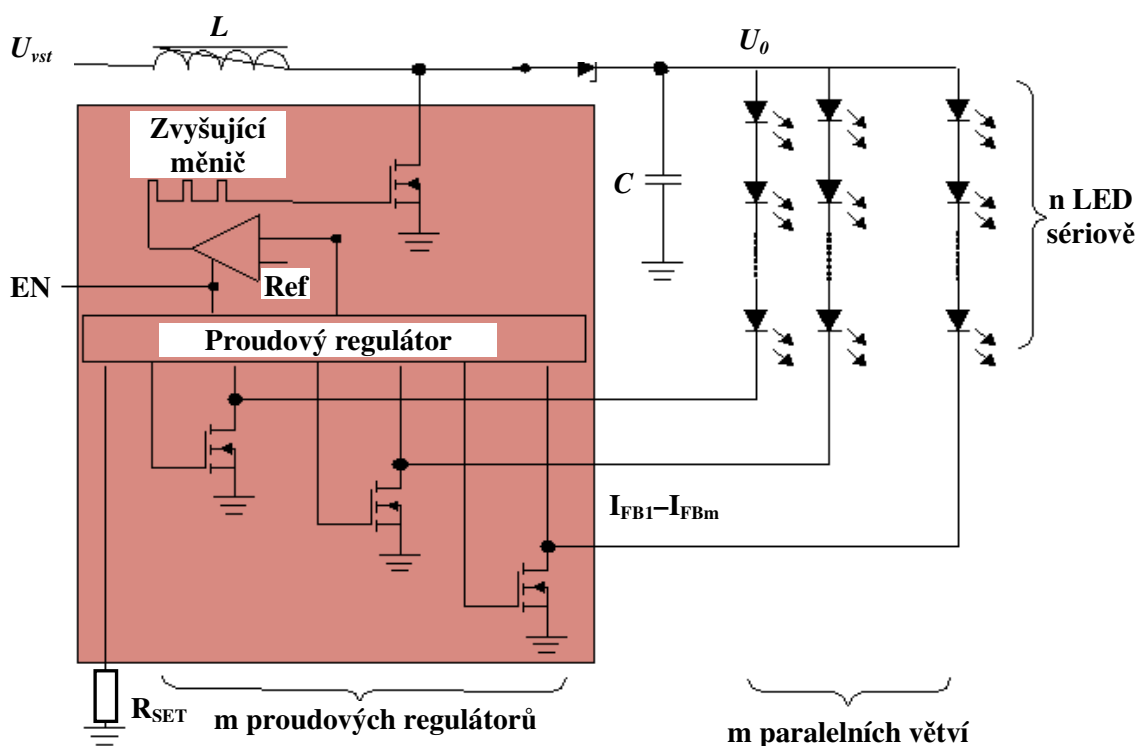


Obr. 26 Měnič se společným nastavením proudu ve větvích s diodami [22]

Zdroj konstantního proudu se realizuje regulací napětí U_{SENSE} na snímacím rezistoru R_{SENSE} . Výstupní napětí U_0 sleduje napěťové změny na jednotlivých U_{LED} , závislých na proudu a teplotě. Úbytky napětí výkonových světelných diod jsou přímo úměrné proudu a nepřímo úměrné teplotě, nabývají hodnot v rozmezí 3,0 V až 8,0 V. Výstupní napětí LED budiče tak musí s rezervou pokrýt součet úbytků zapojených diod. Při návrhu se samozřejmě uvažuje nejvyšší možný součet úbytků diod při maximálním proudu danou větví. [22]

3.3.2 Rozdělené nastavení proudů ve větvích

Dále je možné rozdělit proud větvemi do samostatných regulačních částí. Realizace je finančně nákladnější, nicméně odpadá nutnost přesného nastavení stabilizačních odporů, které bylo nutné vyřešit u předchozího způsobu, aby nedocházelo k odlišným jasům jednotlivých větví. Schéma měniče s rozděleným nastavením proudů ve větvích je na obr. 27. [22]



Obr. 27 Měnič s rozděleným nastavením proudu ve větvích s diodami [22]

Tento LED budič má v jednom integrovaném obvodu vedle zvyšujícího měniče také několikanásobný regulátor proudu, který dodává stejný proud do jednotlivých větví. Tento regulátor proudu vyhodnocuje napěťový pokles na každém vývodu I_{FBn} , aby měnič dosáhl odpovídajícího výstupního výkonu k pokrytí jednotlivých úbytků. [22]

3.4 Stmívání

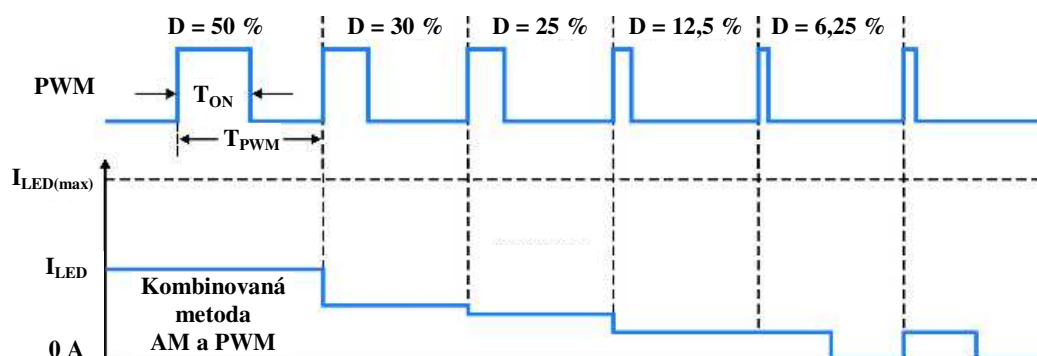
Běžné osvětlovací soustavy jsou založeny na základním principu zapnuto-vypnuto, ale stále se zvyšuje podíl aplikací s požadavkem regulace mezi 0 % až 100 %. Nejčastěji se využívá dvou základních přístupů, a to buď řídit proud světelných diod spojitě (amplitudová modulace), nebo se použijí spínací obvody pracující při dostatečně vysokých frekvencích, aby oko nerozeznalo pokles svítivosti (pulzně šířková modulace).

Základní metody stmívání

Na obr. 28 nahoře je uveden princip stmívání pulzně šířkovou modulací (PWM). Střední hodnota proudu diodou je určena součinem střídý průběhu PWM a maximálního proudu diody: [22]

$$I_{LED(av)} = \frac{D}{I_{LED(max)}} \quad (5)$$

Maximální hodnota proudu diod je neměnná, a proto stmívání prostřednictvím PWM poskytuje lineární změny jasu. Jelikož vyzářené spektrum závisí na úbytku napětí, ten se mění v závislosti na proudu I_F , bude náhr. teplota chromatičnosti diod při PWM téměř konstantní.[22]

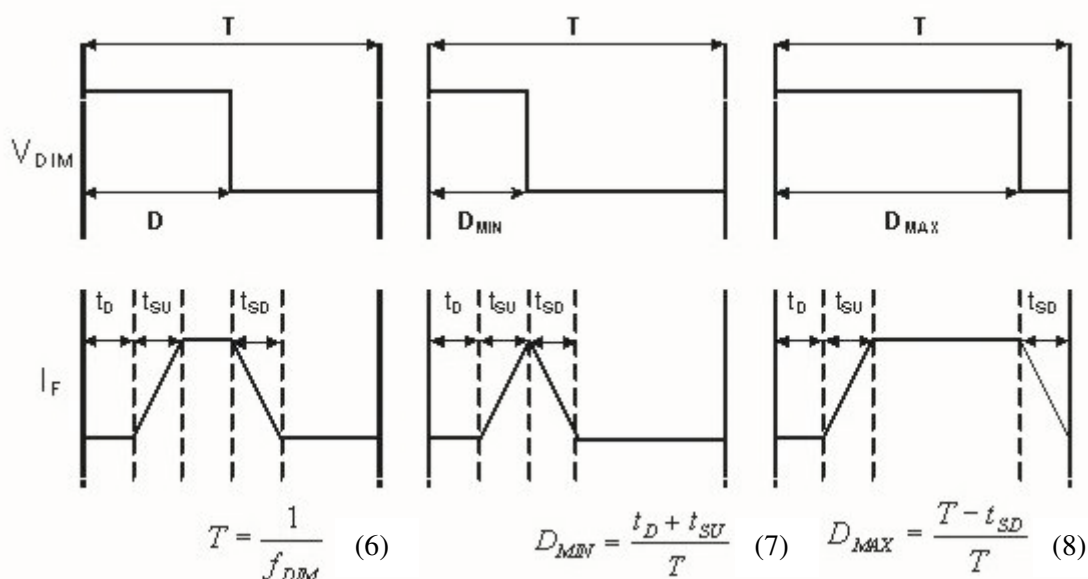


Obr. 28 Pulzně šířková modulace a kombinovaná metoda PWM a AM [22]

Zvlnění výstupního proudu při použití amplitudové modulace je zmenšeno, protože výstupní napětí, a následně i proud, jsou regulovány měničem. Stmívání amplitudovou modulací je však nepřesné v nízkých výstupních úrovních, protože odpovídající napětí jsou tak nízká, že je na ně necitlivý zesilovač odchylky. Omezovaný jas se nemění lineárně, dochází také ke změně chromatičnosti vydávaného záření, zvláště při stmívání na nízké výstupní úrovni. Často užívaným způsobem stmívání diod je kombinace PWM a AM (obr. 28 dole). [22]

Frekvence stmívání a poměr stmívání

Zpožděná odezva LED udiče na PWM signál je běžným problémem při návrhu. Rozlišují se tři hlavní druhy zpoždění (obr. 29). Doby jejich trvání snižují dosažitelný stmívací poměr.



Obr. 29 Druhy stmívacích zpoždění [40]

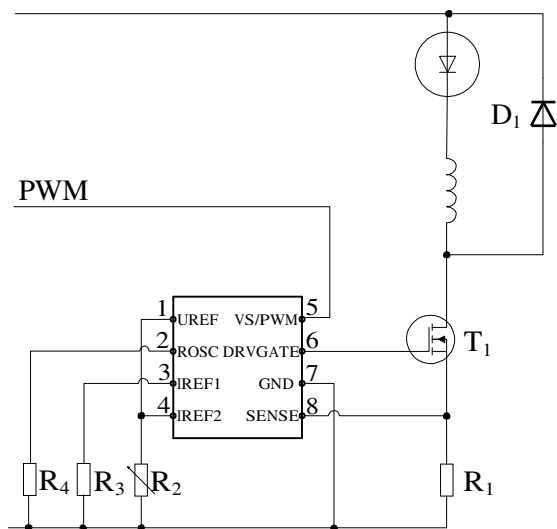
Ve vztahu (7) je t_D přenosové zpoždění nastupu signálu U_{DIM} na úroveň High do reakce LED budiče zvýšením výstupního proudu; t_{SU} je zpoždění nárůstu výstupního proudu z nulové hodnoty na požadovanou úroveň; t_{SD} je zpoždění poklesu výstupního proudu z požadované úrovně na nulovou hodnotu. Nižší frekvence stmívání znamená vyšší poměr stmívání, protože náběžné časy vytvoří kratší část periody stmívání. Dolní hranice frekvence stmívání se nastavuje na 100 Hz, pod kterými lidské oči nerozlišují jednotlivé pulzy. Horní hranice je určena minimálním potřebným kontrastním poměrem. Kontrastní poměr je dán převrácenou hodnotou minimálního náběžného času:

$$CZ = \frac{1}{t_{ON\min}} : 1 \quad (9)$$

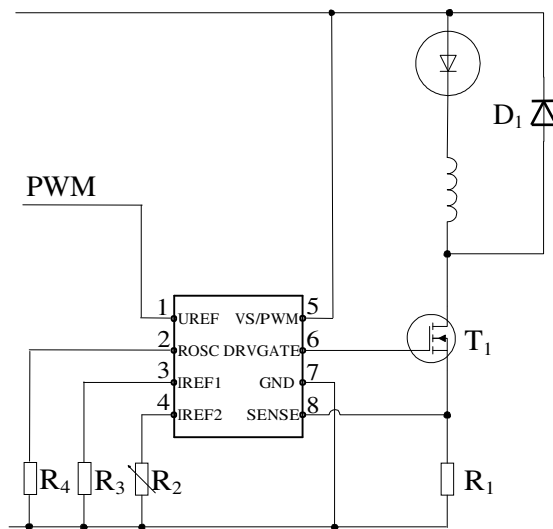
$$\text{kde } t_{ON\min} = t_D + t_{SU} [40]$$

3.4.1 Nízkofrekvenční PWM stmívání

Moderní LED budiče mají ve své struktuře implementovány obvody pro stmívání AM i PWM. Výstupem LED budiče je řízení spínání výkonového spínače. Spínání je realizováno po přivedení PWM signálu na příslušný napájecí nebo povolovací vstup budiče (obr. 30). [48]



Obr. 30a Řízení PWM signálem na napájecím vstupu [48]



Obr. 30b Řízení PWM signálem na povolovacím vstupu [48]

Tyto způsoby stmívání však neumožňují dosažení vysokých modulačních frekvencí, protože integrovaný obvod LED budiče způsobuje kvůli své složité vnitřní struktuře přílišné zpoždění t_D . Horní hranicí stmívací frekvence těchto struktur je přibližně 500 kHz. [48]

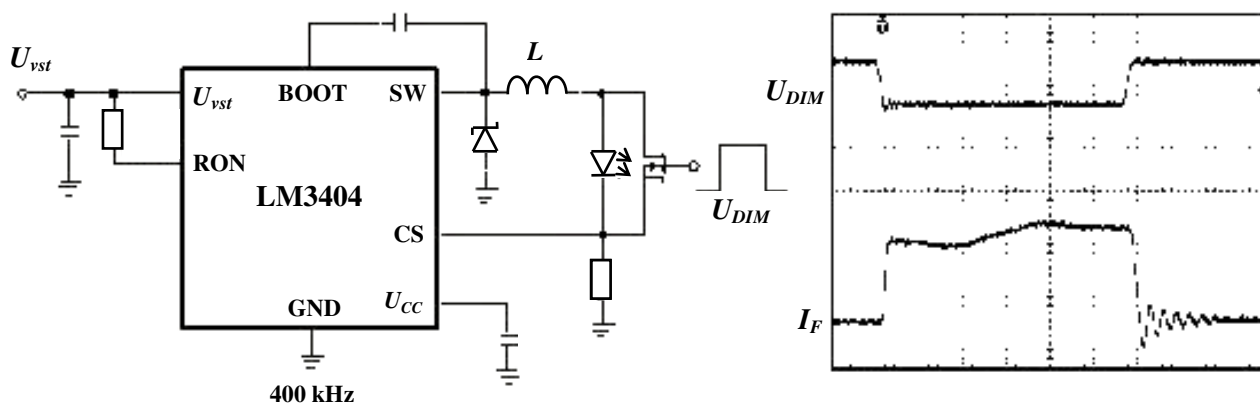
V oblastech s požadavkem vysoké modulační frekvence, kde nelze použít ani snižující budič bez výstupního kondenzátoru, je nutné navrhnout jiné řešení.

3.4.2 Vysokofrekvenční PWM stmívání

Pro zachování vysokého kontrastního poměru je nutné zkrátit parametry časového zpoždění. Vysokofrekvenční PWM stmívání se realizuje dvěma základními způsoby zapojení LED budičů – paralelního a sériového.

Paralelní PWM

Používá se rychlý snižovací regulátor bez výstupního kondenzátoru, jehož zpoždění spínání výstupního proudu závisí na zpoždění integrovaného obvodu a parametřů výstupní cívky. Pro zvýšení rychlosti stmívání musejí být oba prvky přemostěny. Nejvhodnějším způsobem realizace je paralelní připojení spínače k diodě (obr. 31). [40]



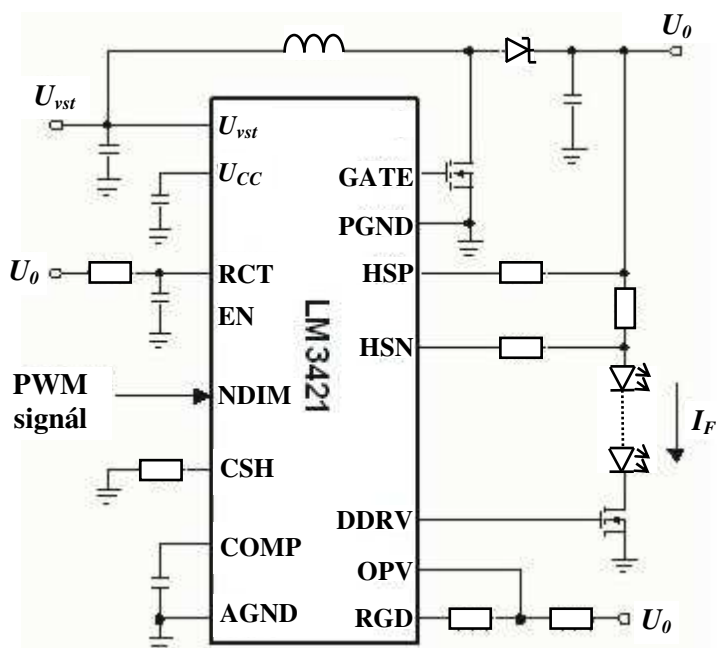
Obr. 31 Zapojení LED budiče a průběhy napětí a proudu pro paralelní PWM [40]

Proudové překmity v průběhu z obr. 31 jsou způsobeny rychlou změnou výstupního napětí, na kterou budič obvod reaguje pro udržení výstupního proudu. [40]

Sériová PWM

V případě LED budiče zvyšující topologie boost jsou omezeny možnosti použití paralelního stmívání kvůli požadovanému výstupnímu kondenzátoru nebo kvůli neřiditelnému proudu vstupní cívky při zkratu na výstupu. [40]

Při požadavku velmi rychlé PWM se používá dvoustupňový systém využívající snižující regulátoru jako doplňkového modulačního prvku proudu. Kde vysoká cena a rozměry nepřipouštějí jeho nasazení, užije se sériového spínání, jehož schéma je na obr. 32. [40]



Obr. 32 Zapojení LED budiče pro sériovou PWM [40]

Následuje srovnání vlastností obou základních typů modulací využívaných pro stmívání světelných diod (tab. 5).

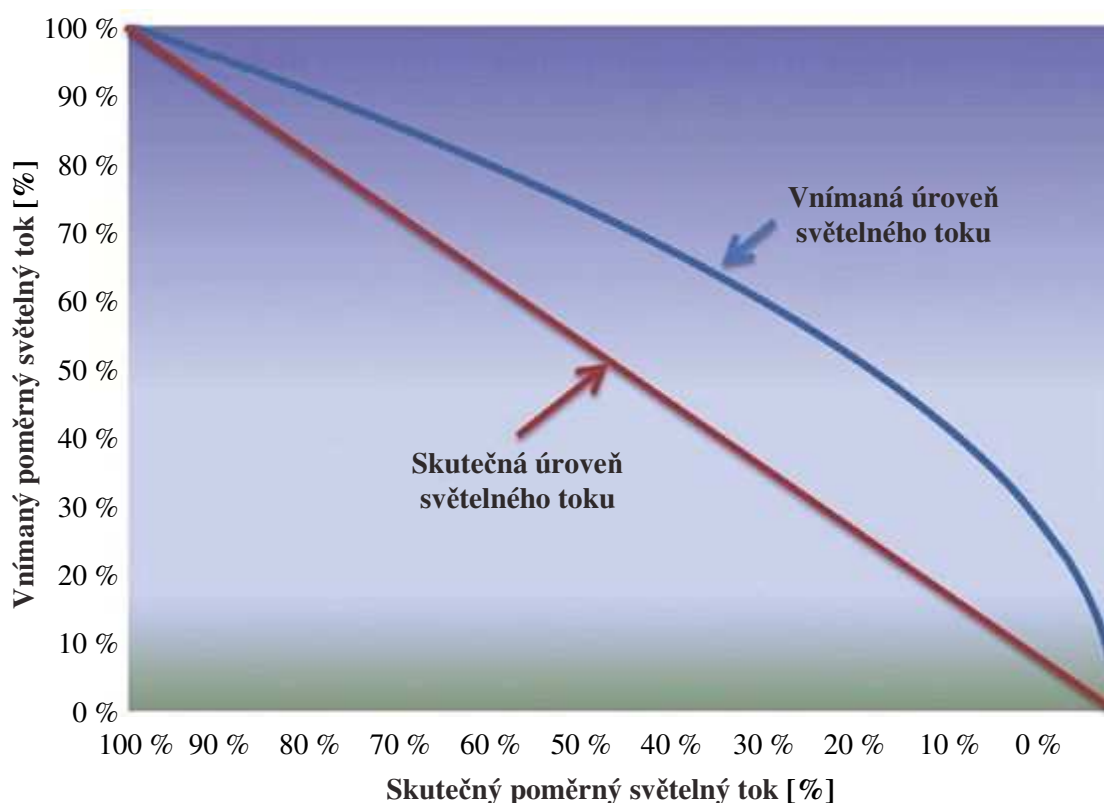
Tab. 5 Výhody a nevýhody AM a PWM [9]

Parametr	Amplitudová modulace	Pulzně šířková modulace
Obtížnost návrhu	Snadné, pokud je regulátor vybaven vstupem pro stmívání.	Vyžaduje přivedený nebo časovačem vytvořený PWM signál.
Posuv v T_{cn}	Stmívání způsobuje viditelný posuv T_{cn} .	Poměrně neměnná T_{cn} v celém rozsahu stmívacích úrovní.
Stmívací rozsah	Omezený ve většině případů.	Lze dosáhnout velmi vysoký kontrastní poměr.
Flexibilita	Změny v rozsahu stmívání jsou ručně nastavitelné.	Změny v rozsahu stmívání jsou programově nastavitelné.
Účinnost	Na nižších úrovních stmívání vyšší než u PWM.	Nižší účinnost při vyšších proudech.
Elektromagnetická kompatibilita	Obvyklé problémy se spínanými zdroji.	Problémy s tranzistory typu FET v některých aplikacích.

4 VLIV ŘÍZENÍ VÝKONOVÝCH SVĚTELNÝCH DIOD NA JEJICH KVALITATIVNÍ A KVANTITATIVNÍ PARAMETRY (SVĚTELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY)

4.1 Vnímaná úroveň světelného toku při stmívání

Vztah mezi skutečnou hodnotou světelného toku redukovanou stmíváním a hodnotou vnímanou člověkem je logaritmické povahy (obr. 34). Snížení např. na polovinu plného světelného toku se jeví jako přibližně 30% pokles. Stmívání v úzkém rozsahu je sotva postřehnutelné. [41]



Obr. 34 Světelný tok svítidla omezený stmíváním a jeho úroveň vnímaná člověkem [41]

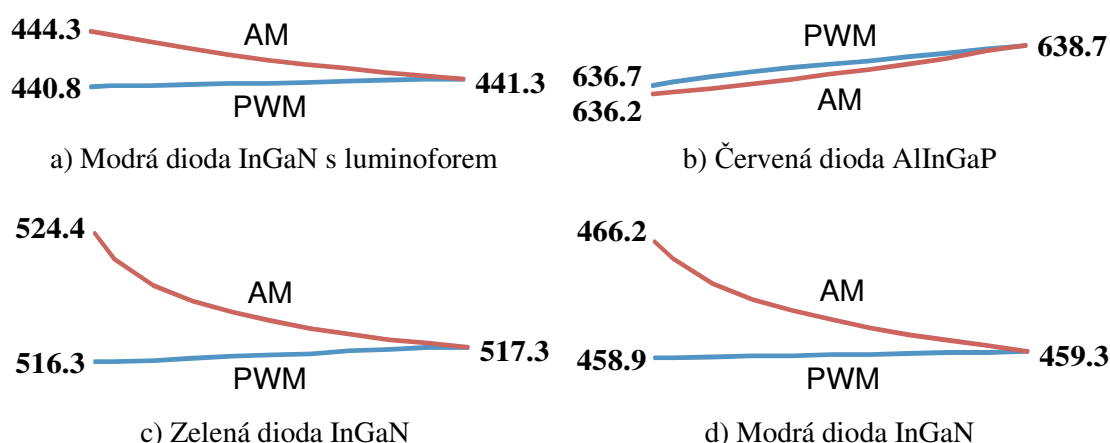
Závislost mezi světelným tokem diod a jejich příkonem není lineární. Při jejich stmívání tak dochází ke snížení jejich měrného výkonu (jednotkou je lm/W). Při razantním snížení světelného toku stmíváním pod přibližně 20 % maximální hodnoty dochází k tak výraznému poklesu měrného výkonu, že dlouhodobý provoz osvětlovací soustavy v tomto nastavení je energeticky nevhodný. [7]

4.2 Vliv stmívání na kvalitativní parametry

4.2.1 Změny spektra záření

Každá z metod stmívání má jiný vliv na složení spektrálního záření světelných diod. Spektrum záření modré diody s luminoforem se skládá ze dvou samostatných vrcholů – jeden vrchol modré diody a druhý vrchol luminoforu. Bílá barva světla této diody se tedy získává ze dvou komplementárních barev, nejčastěji modré a žluté, a proto pozice bílého bodu v trichromatických souřadnicích není závislá pouze na jediné dominantní vlnové délce. V případě RGB diod je situace jednodušší – každý z čipů vyzařuje pouze v okolí jediné vlnové délky.

Následující diagramy (obr. 35) dokládají posun dominantní vlnové délky při stmívání s využitím amplitudové a pulzně šířkové modulace. Nezávisle proměnnou veličinou ve vodorovném směru je střední hodnota modulovaného proudu (u amplitudové modulace), resp. součin maximálního proudu diody a středy (u pulzně šířkové modulace).



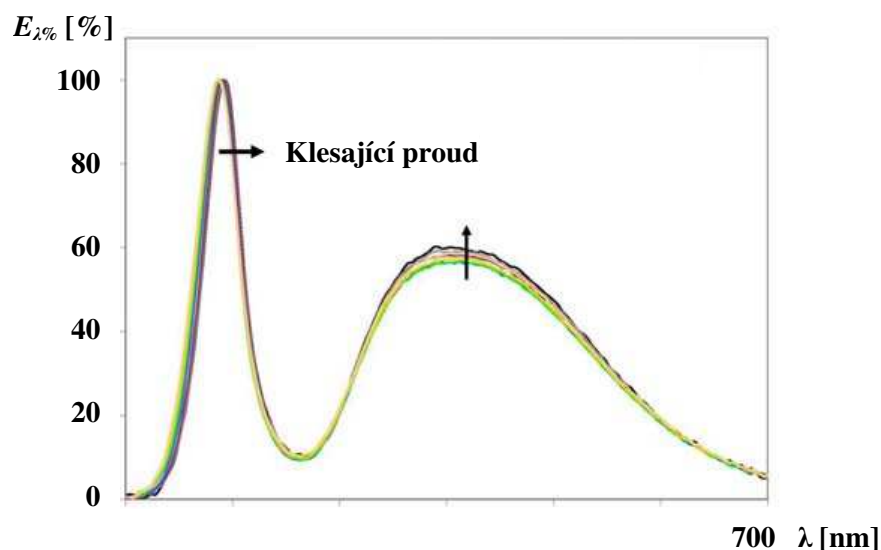
Obr. 35 Diagramy pozic dominantní vlnové délky diod stmíváním amplitudovou modulací (AM) a pulzně šířkovou modulací (PWM) [16]

Posun vlnové délky záření luminoforu je takřka nulový, proto dochází při stmívání k posunu pouze v krátkovlnné oblasti. Na obr. 35a je vidět, že snižujícím se proudem amplitudovou modulací se mění vrchol modré diody směrem do dlouhovlnné oblasti, vlnová délka při řízení pulzně šířkovou modulací zůstává téměř nezměněna v celém rozsahu řízení.

Podobný charakter změn jako u modré diody s luminoforem vykazuje u obou metod řízení také zelená a modrá dioda o stejném chemickém složení čipu (obr. 35c a obr. 35d). Také tady platí pozvolný posun dominantní vlnové délky k nižším hodnotám se snižující se střídou.

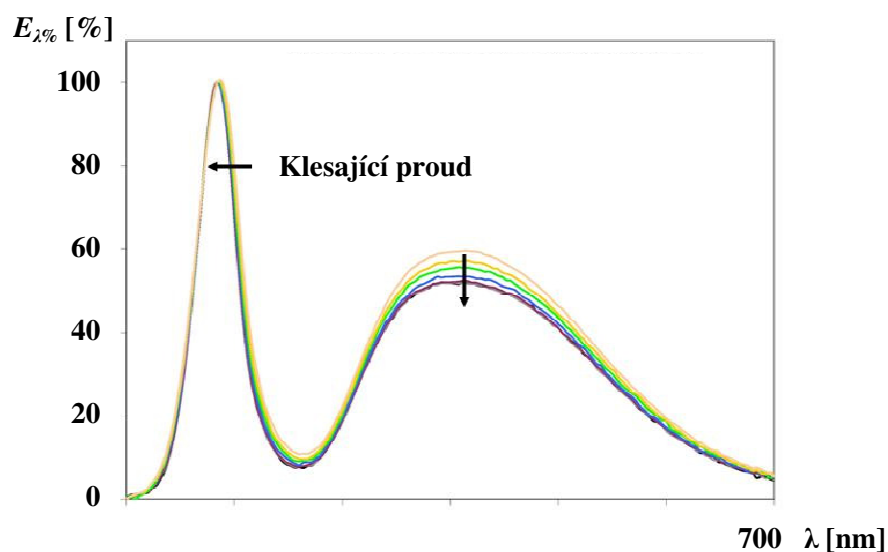
Dominantní vlnová délka červené diody tvořené sloučeninou AlInGaP se při AM posouvá naopak než u ostatních typů diod. Její hodnota se snižuje se střední hodnotou proudu.

Názornější pohled v rámci spektra záření pro modrou diodu s luminoforem poskytují obr. 36 a 37. Dominantní vlnová délka luminoforu se při žádné z metod řízení nemění, ovšem její amplituda řízením amplitudovou modulací roste s klesajícím proudem, u pulzně šířkové modulace platí mezi amplitudou a střídou přímá úměra.



Obr. 36 Vliv stmívání amplitudovou modulací na spektrum modré diody s luminoforem [21]

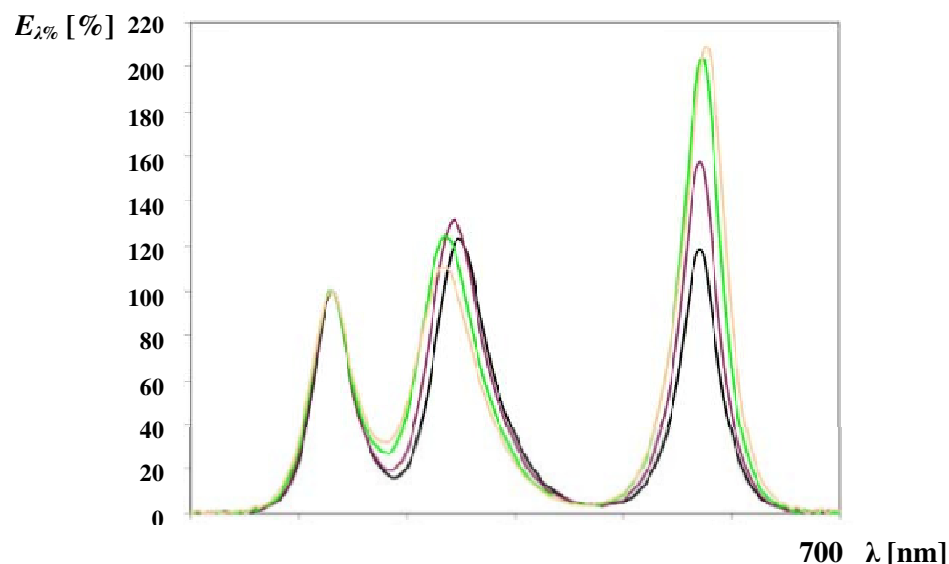
Ze spektra záření modré diody s luminoforem ovlivňovaného amplitudovou modulací (obr. 36) vyplývá, že stmíváním touto modulací dochází ke zvýšení podílu záření v žlutozelené oblasti (okolo 560 nm) oproti nestmívané diodě, tudíž náhradní teplota chromatičnosti bude nižší (teplejší bílá).



Obr. 37 Vliv stmívání pulzně šířkovou modulací na spektrum modré diody s luminoforem [21]

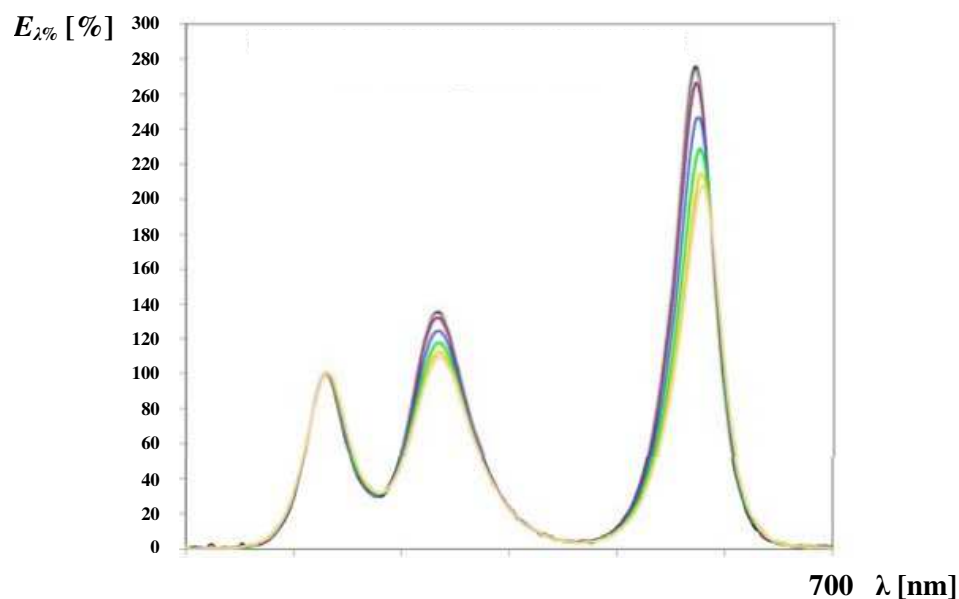
Naopak řízením modré diody s luminoforem pulzně šířkovou modulací (obr. 37) se snižuje poměr záření luminoforu k záření modré diody, v důsledku čehož náhradí teplota chromatičnosti takové diody vzroste (studenější bílá).

Následující obr. 38 a obr. 39 dokládají změny v záření RGB diod při stmívání.



Obr. 38 Vliv stmívání amplitudovou modulací na spektrum záření RGB diody [21]

Stmíváním amplitudovou modulací nedochází ke změně dominantní vlnové délky ani amplitudy modré diody. Podíl zeleného záření se stmíváním zvyšuje a posunuje k delším vlnovým délkám, podíl červeného záření se snižuje a posunuje ke kratším vlnovým délkám. Při snižování proudu RGB diody bude výsledný barevný tón zelený.



Obr. 39 Vliv stmívání pulzně šířkovou modulací na spektrum RGB diody [21]

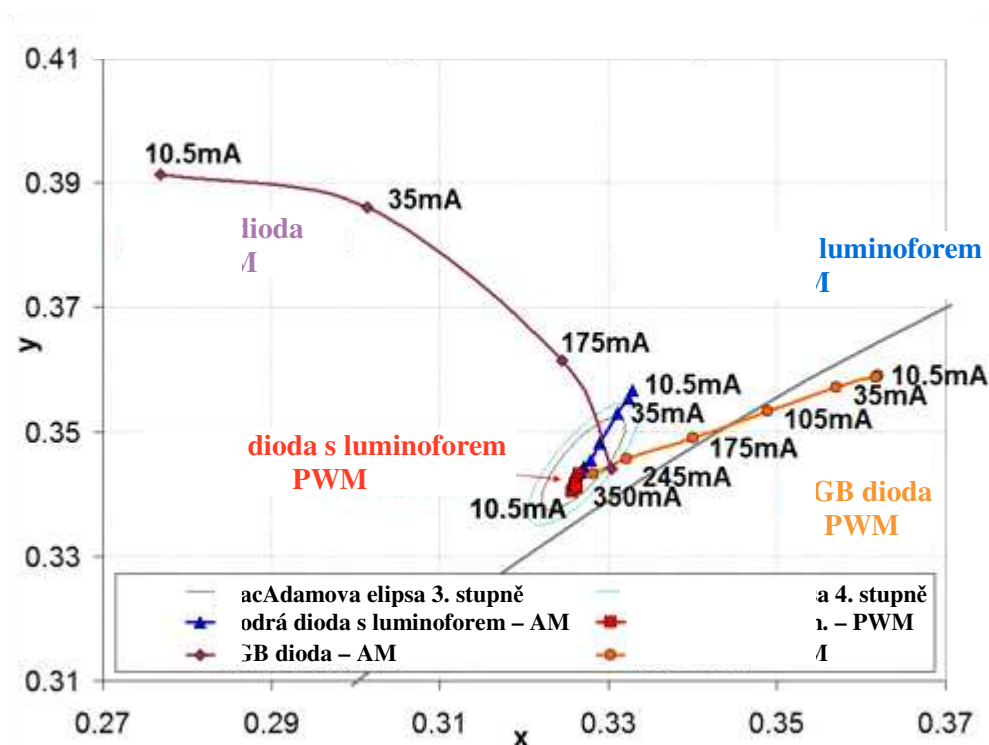
Stmívání pulzně šířkovou modulací zvyšuje podíl zelené a červené složky spektra záření. Jak již bylo uvedeno na obr. 35 – dominantní vlnové délky se posunují ke kratším vlnovým délkám. Neměnné hodnoty modrého záření společně se zvýšeným podílem v dlouhovlnné oblasti zapříčiňují nižší náhradní teplotu chromatičnosti při nižších proudech.

4.2.2 Změny chromatičnosti

Barevný vjem bývá vyjádřen souřadnicemi v některé z kolorimetrických soustav. Pro popis dále uvedených kvalitativních parametrů budou použity pravoúhlé souřadnice x a y kolorimetrické soustavy $X Y Z$.

Lidské oko má odlišnou citlivost na různé vlnové délky, a je tak schopné rozeznávat malé rozdíly v barvě (ne však malé rozdíly v sytosti). Odchyłky v barevnosti vyjadřují tzv. MacAdamovy elipsy. Jejich plocha vymezuje oblast, v níž člověk nerozliší změny barvy.

Obr. 40 znázorňuje posuny v diagramu chromatičnosti v celém rozsahu stmívání pomocí AM a PWM modré diody s luminoforem a RGB diody.



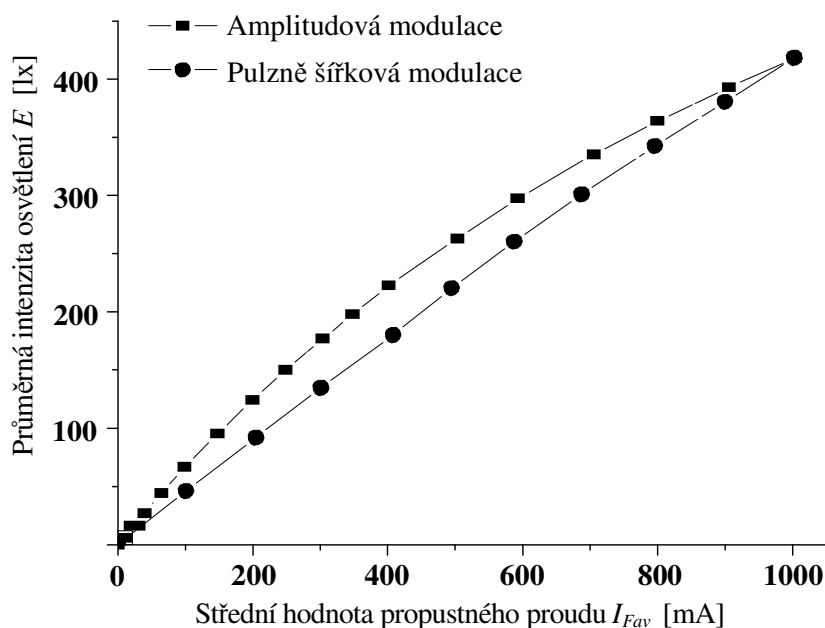
Obr. 40 Posun chromatičnosti modré diody s luminoforem a diody RGB stmíváním amplitudovou modulací (AM) a pulzně šířkovou modulací (PWM)

Výsledky experimentálních studií dokazují, že u modré diody s luminoforem dochází v rámci celého rozsahu stmívání pulzně šířkovou modulací k nepatrnému posunu chromatičnosti vydávaného světla (posun probíhá v rámci MacAdamovy elipsy 3. stupně). Ani při stmívání amplitudovou modulací není postřehnutelný posun chromatičnosti této diody.

Naopak stmívání oběma metodami způsobuje velké změny chromatičnosti vydávaného záření RGB diod, posuny probíhají v různých směrech diagramu chromatičnosti. K omezení tohoto jevu je nutné nasazení aktivního zpětnovazebního systému stmívání. Linearita křivky, po které probíhá posun při stmívání pulzně šířkovou modulací, umožňuje snadnější korekci posunu.

4.3 Vliv stmívání na kvantitativní parametry

4.3.1 Změny světelného toku



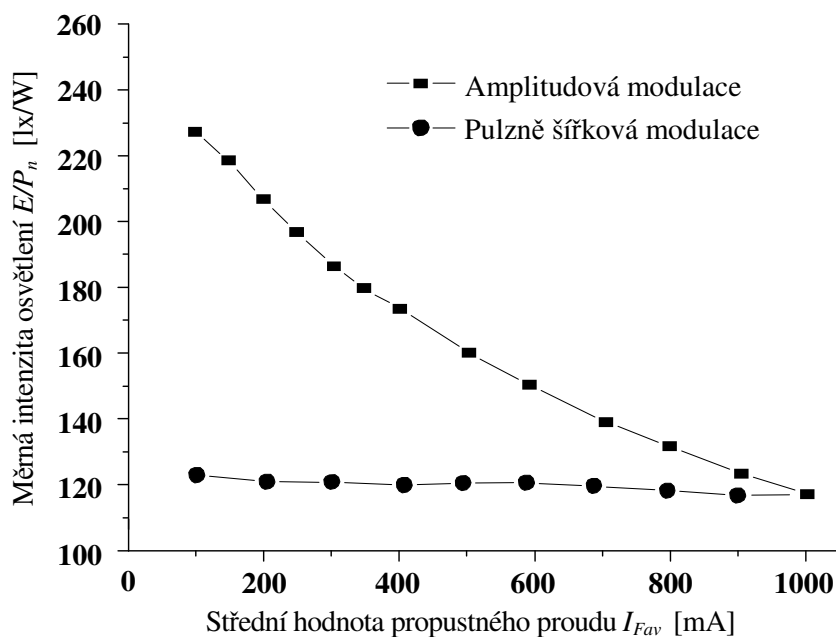
Obr. 41 Závislost průměrné intenzity osvětlení na úrovni stmívání [29]

Při nízkých hodnotách protékaného proudu se intenzita osvětlení mění lineárně u obou modulací. Dále nárůstající proud má tendenci k nasycení, což v důsledku znamená, že se při vyšších proudech snižuje účinnost přeměny el. energie na světelnou.

Průměrná intenzita osvětlení u pulzně šířkové modulace zůstává v celém rozsahu řízení na nižší hodnotě než řízením proudu amplitudovou modulací.

4.3.2 Změny účinnosti

Stmíváním dochází mimo jiné ke změně proudových poměrů v čipu. Účinnost extrakce světla je závislá na hodnotě procházejícího proudu, což může být doloženo následujícím grafem (obr. 42).



Obr. 42 Závislost měrné intenzity osvětlení na úrovni stmívání [29]

Při řízení proudu pulzně šířkovou modulací je měrná intenzita osvětlení téměř neměnná v celém rozsahu propustného proudu. Naopak hodnota tohoto činnostního parametru klesá s rostoucím amplitudově modulovaným proudem. Podobné charakteristiky jsou pro korektnost získaných dat měřeny při neměnné teplotě, v tomto případě při 60 °C.

5 NÁVRH A POROVNÁNÍ OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV S KLASICKÝMI A MODERNÍMI SVĚTELNÝMI ZDROJI (LED)

Pro účely této diplomové práce byl použit vypracovaný projekt osvětlení nové multifunkční budovy Fakulty elektrotechniky a informatiky Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v Ostravě-Porubě, ulice 17. listopadu 2172/15. V projektu se uvažuje nasazení svítidel společnosti Thorn Lighting CS, spol. s r. o.

Byly vybrány dvě místnosti, u nichž bude posouzeno stávající řešení osvětlení a navržena alternativa se svítidly využívajícími výkonové světelné diody. Hlavním kritériem pro výběr posuzovaných místností bylo použití svítidel typu downlight, což splňují některé chodby, místnosti se sociálním zařízením a sekretariáty. Vybrána byla předsíň pánských toalet (místnost B 2.21), nacházející se v severovýchodní části budovy v prvních čtyřech podlažích, a sekretariát (místnost A 2.31), situovaný východně v prvních třech podlažích budovy. Místnosti byly namodelovány podle dodaných CAD dat v programu pro návrh osvětlení – DIALux.

5.1 Osvětlení v místnosti B 2.21

Místnost č. B 2.21 – Předsíň WC muži – má plochu 14,38 m², na podlaze položeno PVC, sádrokartonový podhled ve výšce 2,7 m nad zemí. Absence osvětlovacích otvorů, jedny dveře z chodby a jedny dveře na pánské toalety, jedno zrcadlo a 6 umyvadel (obr. 43).



Obr. 43 Pohled na model místnosti B 2.21 v programu DIALux [15]

5.1.1 Navržené osvětlovací soustavy

Původní soustava se svítidly Cruz 240

Původní návrh plánuje použití čtyř svítidel Thorn Cruz 240H 2 x 26 W TC-DEL HF, což je vestavný downlight se dvěma kompaktními zářivkami typu TC-DEL, každá o příkonu 26 W, světelný tok svítidla 3600 lm, index barevného podání $R_a = 80$ při náhradní teplotě chromatičnosti 4000 K, předřadník je elektronický, celkový příkon svítidla činí 51 W. Další podrobnosti o svítidle obsahuje datový list svítidla v příloze 1.

Nově navržená soustava se svítidly Fortimo 2000

Společnost Philips spolupracuje se zaměstnanci VŠB na vývoji LED modulů Fortimo, s nimiž počítá následující návrh. Pro danou místnost je uvažováno o nasazení tří diodových modulů Philips Fortimo LED DLM 2000 29 W/840 o světelném toku 2000 lm s indexem barevného podání $R_a = 80$ při náhradní teplotě chromatičnosti 4000 K. Příkonem 29 W se rozumí součet příkonu LED modulu a předřadníku. Další údaje o svítidle jsou popsány v jeho datovém listě (příloha 10).

5.1.2 Požadavky na osvětlení v místnosti B 2.21

Místnost B 2.21 je dle normy pro umělé osvětlení ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory zaříděna do druhu prostoru s referenčním číslem 1.2.4 – šatny, umývárny, koupelny, toalety. Požadované hodnoty světelnotechnických veličin jsou následující: [12]

- udržovaná intenzita osvětlení $\bar{E}_m = 200 \text{ lx}$;
- jednotné omezení oslnění $UGR_L = 22$;
- index barevného podání $R_a = 80$.

Činitelé odrazu povrchů místnosti byly zvoleny v souladu s doporučeními v části 4.2 uvedené normy, a to činitel odrazu stropu 0,80; stěn 0,70; podlahy 0,40. Všechny plochy mají bílou barvu.

S ohledem na požadavek udržované intenzity osvětlení je nutné specifikovat udržovací činitel použitých svítidel. Udržovací činitel z je určen součinem dílčích činitelů:

$$z = z_p \cdot z_s \cdot z_z \cdot z_{fs} \quad (10)$$

kde	z_p	činitel znečištění ploch místnosti;
	z_s	činitel znečištění svítidel;
	z_z	činitel stárnutí světelných zdrojů;
	z_{fs}	činitel funkční spolehlivosti světelných zdrojů. [5]

Činitel znečištění ploch místnosti z_p nabývá hodnoty 0,94. Místnost je vyhodnocena jako prostor velmi čistý, interval údržby je stanoven na 3 roky.

Činitel znečištění svítidel z_s je stejně jako v předchozím případě vyčíslen pomocí programu DIALux, jeho hodnota je 0,88 v případě svítidel Cruz 240 s krytím IP 20. Diodová svítidla Fortimo 2000 jsou provozována s otevřeným reflektorem, který se však na distribuci světelného toku podílí minimálně. Optická účinnost celého svítidla 97 % dokládá zanedbatelné ztráty odrazem od povrchu reflektoru, proto lze tento činitel ohodnotit na 0,95.

Činitel stárnutí světelných zdrojů je stanoven jejich výrobcí. Kompaktní zářivky použité ve svítidlech Cruz 240 mají dobu života 12 000 hodin provozu, po které klesne jejich tok na 80 % počáteční hodnoty, proto $z_{fs} = 0,80$. Diodové moduly Fortimo druhé generace dosahují při teplotě 65 °C na kontrolním bodě servisní doby života 50 000 hodin, při které se odhaduje 30% pokles z jejich původního světelného toku, tedy $z_{fs} = 0,70$. Předpokládá se denní doba provozu 10 hodin po 258 dní v roce. Roční provozní doba 2580 hodin tak znamená vzhledem k době života použitých světelných zdrojů interval jejich výměny po 4,75 roku ve svítidlech Cruz 240 a 19 let v případě svítidel Fortimo 2000.

Požadavek na neprodlenou výměnu nefunkčních světelných zdrojů zaručuje nejvyšší možnou hodnotu činitele funkční spolehlivosti světelných zdrojů $z_{fs} = 1,00$.

Udržovací činitel z má tedy u svítidel Cruz 240 hodnotu 0,66, u svítidel Fortimo 2000 hodnotu 0,63. Kompletní plán údržby světelných zdrojů je uveden pro soustavu se svítidly Cruz 240 v příloze 3, resp. v příloze 12 pro soustavu s LED moduly Fortimo 2000.

5.1.3 Porovnání parametrů navržených osvětlovacích soustav

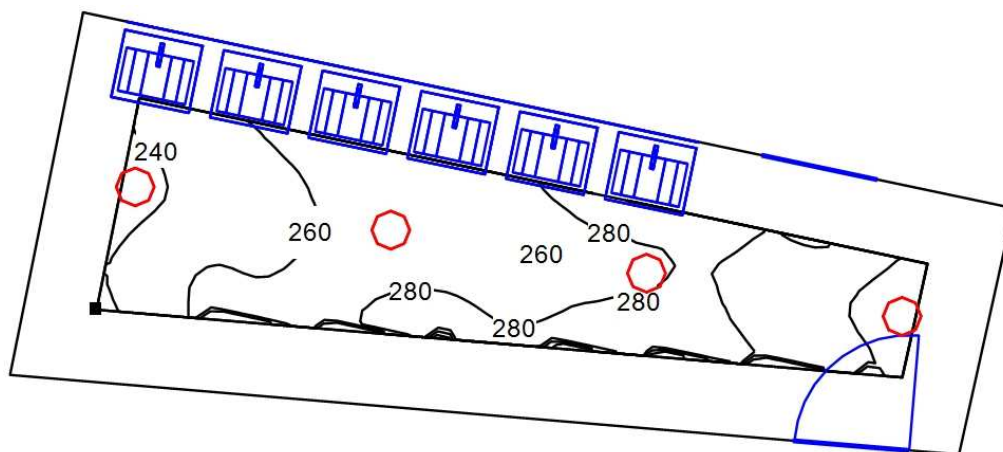
Udržovaná intenzita osvětlení \bar{E}_m

Obě soustavy splňují požadavek na udržovanou intenzitu osvětlení $\bar{E}_m = 200$ lx a doporučení národní přílohy Z1 normy ČSN 12464-1 o minimální hodnotě rovnoměrnosti osvětlení 0,3 na srovnávací rovině. Tato rovina je uvažována na podlaze ve vzdálenosti 0,5 m od stěn. Původně navržená soustava se čtyřmi svítidly Cruz 240 zajišťuje udržovanou intenzitu osvětlení na srovnávací rovině $\bar{E}_m = 278$ lx při vysoké rovnoměrnosti $E_{min}/\bar{E}_m = 0,852$, nicméně soustava s diodovými svítidly Fortimo 2000 splňuje požadavky normy i při sníženém počtu tří světelných míst (tab. 6). Příkon soustavy Fortimo 2000 představuje snížení instalovaného příkonu P_i na přibližně 42,6 % z původní 204W hodnoty.

Tab. 6 Porovnání intenzit osvětlení na srov. rovině a příkonů soustav v místnosti B 2.21 [15]

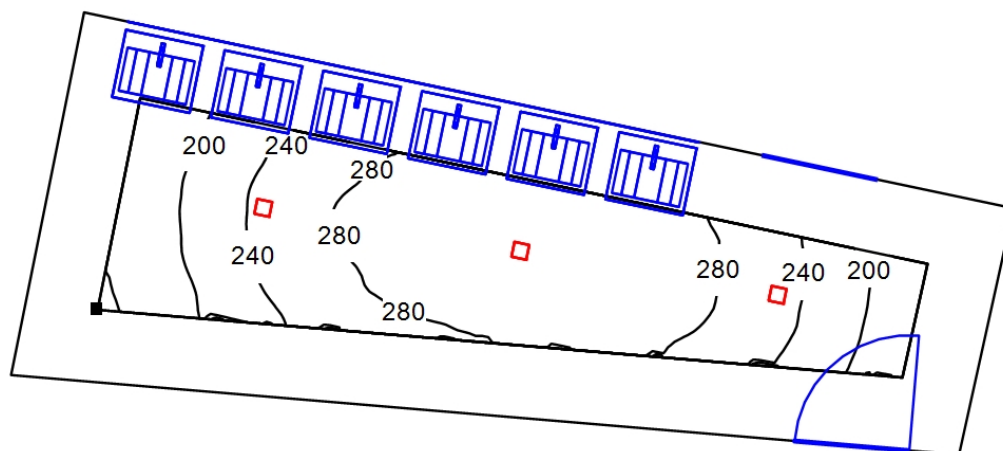
	\bar{E}_m	E_{min}	E_{max}	E_{min}/\bar{E}_m	P_i
	[lx]	[lx]	[lx]	[]	[W]
Soustava Cruz 240	267	227	297	0,848	204
Soustava Fortimo 2000	255	151	302	0,595	87

Vysokou rovnoměrnost soustavy Cruz 240 na srovnávací rovině (podlaze) dokládá izoluxová mapa místnosti B 2.21 (obr. 44).



Obr. 44 Izoluxy původně navržené soustavy se svítidly Cruz 240 v místnosti B 2.21 [15]

Soustava Fortimo 2000 nedosahuje tak vysoké udržované intenzity osvětlení a rovnoměrnosti jako soustava Cruz 240. Tři svítidla Fortimo 2000 jsou rozmístěna ve stejné přímce v bodech přesně mezi svítidly z původního návrhu. (obr. 45).



Obr. 45 Izoluxy nově navržené soustavy se svítidly Fortimo 2000 v místnosti B 2.21 [15]

Jednotné omezení oslnění UGR_L

Hodnoty činitele oslnění UGR posuzovaných soustav nepřesahují hodnotu jednotného omezení oslnění $UGR_L = 22$ pro tento druh prostoru. Výpočtové plochy UGR byly umístěny ve čtyřech horizontálních na sebe kolmých směrech ve výšce 1,5 m nad podlahou. Ve směru pohledu do zrcadla a v protějším směru je u obou osvětlovacích soustav činitel oslnění nižší než 10. Oslnění pozorovatele hledícího na západní stěnu lze vyjádřit hodnotou $UGR = 19$

u soustavy Cruz 240 a $UGR = 22$ u soustavy Fortimo 2000. Při pohledu na východní stěnu má činitel oslnění UGR hodnotu 21 v případě soustavy Cruz 240 a hodnotu 22 při zvolení realizace osvětlovací soustavy Fortimo 2000.

Index barevného podání R_a

Požadavek indexu barevného podání $R_a = 80$ je splněn u obou porovnávaných osvětlovacích soustav, světelné zdroje použité ve svítidlech dosahují právě této hodnoty.

5.2 Osvětlení v místnosti A 2.31

Místnost č. A 2.31 – Sekretariát – má plochu $18,25 \text{ m}^2$, podlaha pokryta dlažbou teraco, sádkartonový podhled ve výšce 3,3 m nad zemí. Absence osvětlovacích otvorů, jedny dveře z chodby a jedny dveře do kanceláře, podlouhlý stůl v rohu a členitý stůl, tři židle, pořadač dokumentů a dvě dekorativní dřeviny (obr. 46).



Obr. 46 Pohled na model místnosti A 2.31 v programu DIALux [15]

5.2.1 Navržené osvětlovací soustavy

Původní soustava se svítidly Cruz 280

Původní návrh počítá s nasazením sedmi svítidel Thorn Cruz 280H 2 x 32 W TC-TELI HF – tj. vestavný downlight se dvěma kompaktními zářivkami typu TC-TELI, každá o příkonu 32 W, světelný tok svítidla 4800 lm, index barevného podání $R_a = 80$ při náhradní teplotě

chromatičnosti 4000 K, externí elektronický předřadník, celkový příkon svítidla je 68 W. Další charakteristiky svítidla uvádí datový list svítidla v příloze 19.

Optimalizovaná původní soustava se svítidly Cruz 280

Původní osvětlovací soustava se sedmi svítidly Cruz 280 zajišťuje udržovanou intenzitu osvětlení v pracovní oblasti 1031 lx, tedy překračuje vhodnou úroveň pro tuto místnost 750 lx o přibližně 37 %. Proto byla vypracována varianta se sníženým počtem svítidel Cruz 280 o srovnatelných parametrech jako soustava se světelnými diodami.

Nově navržená soustava se svítidly Fortimo 3000

Ze skupiny LED modulů Fortimo může dostatečnou intenzitu osvětlení při nízkém počtu světelných míst zajistit pouze Philips Fortimo LED DLM 3000 49 W/840 o světelném toku 3000 lm, index barevného podání R_a má opět hodnotu 80 při náhradní teplotě chromatičnosti 4000 K. Celkový příkon 49 W opět zahrnuje příkon LED modulu s potřebným předřadníkem. Datový list tohoto svítidla je v příloze 39.

5.2.2 Požadavky na osvětlení v místnosti A 2.31

Dle normy ČSN EN 12464-1 pro osvětlení vnitřních pracovních prostorů splňuje tato místnost charakter prostoru s referenčním číslem 3.6 – recepce. Základní požadavky na osvětlení jsou tyto: [12]

- udržovaná intenzita osvětlení $\bar{E}_m = 300 \text{ lx}$;
- jednotné omezení oslnění $UGR_L = 22$;
- index barevného podání $R_a = 80$.

Jelikož je na tomto pracovišti zamezen přístup dennímu světlu a zároveň vykonáván trvalý pobyt lidí (definice v části 3.1.3 normy ČSN 73 0580-1 Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky), navyšuje se udržovaná intenzita osvětlení dle nařízení vlády č. 361/2007 Sb. o jeden stupeň řady (v tomto případě na 500 lx). Pro minimalizaci negativního vlivu nedostatku denního světla na lidský organismus je žádoucí hladinu intenzity osvětlení zvýšit o další stupeň (na 750 lx). [13], [14]

Charakter činností vykonávaných v této místnosti umožňuje rozdělit její prostor do několika funkčně vymezených částí s různou náročností zrakového úkolu. Soustředěním světelného toku svítidel do zrakově nejnáročnějších míst a naopak jeho snížením v jiných místech lze snížit energetickou náročnost osvětlovací soustavy. Prostor této místnosti byl rozdělen na pracovní oblast, kterou je zakulacená polovina členitého stolu v jeho výšce 0,75 m; na okolní oblast jako pás o šířce 0,5 m obklopující pracovní oblast ve stejné výšce 0,75 m; a na komunikační oblast ve směru od členitého stolu ke dveřím na úrovni podlahy (viz přílohy).

Při požadavku normy ČSN 12464-1 v části 4.3.2 na intenzitu osvětlení v pracovní oblasti 750 lx by rovnoměrnost neměla být menší než 0,7. Přitom intenzita osvětlení v okolní oblasti

se volí o stupeň nižší, tedy 500 lx s rovnoměrností osvětlení alespoň 0,5. Nejnižší nároky jsou kladeny na osvětlení komunikační oblasti, kde postačuje intenzita 300 lx při rovnoměrnosti 0,3.

Odrazné vlastnosti povrchů jsou ohodnoceny stejně jako u místnosti B 2.21, tedy bílá barva s činitelem odrazu stropu 0,80; stěn 0,70 a podlahy 0,40.

Dílní činitelé pro stanovení udržovacího činitele osvětlovací soustavy jsou specifikováni také stejně. Soustava se svítidly Cruz 280 má $z = 0,66$, v případě soustavy s LED moduly Fortimo 3000 se udržovací činitel z rovná 0,63.

Svítidla nad pracovní oblastí a v jejím okolí jsou u všech tří variant rozmístěna ve stejných bodech (viz situační plány svítidel v přílohách 22, 31 a 42).

5.2.3 Porovnání parametrů navržených osvětlovacích soustav

Udržovaná intenzita osvětlení \bar{E}_m

Původně navržená soustava se sedmi svítidly Cruz 280 i dvě nové varianty se sníženým instalovaným příkonem splňují požadavky na intenzitu osvětlení i rovnoměrnost. Porovnání těchto světelnotechnických parametrů uvádí tab. 7.

Tab. 7 Porovnání příkonů soustav a intenzit osvětlení na srovnávacích rovinách v místnosti A 2.31 [15]

		Soustava Cruz 280	Optimalizovaná soustava Cruz 280	Soustava Fortimo 3000
Počet svítidel soustavy	[ks]	7	5	6
Příkon svítidla	[W]	68	68	49
Instalovaný příkon soustavy P_i	[W]	476	340	294
Pracovní oblast				
Udržovaná intenzita osvětlení \bar{E}_m	[lx]	1031	765	803
Minimální intenzita osvětlení E_{min}	[lx]	978	714	721
Maximální intenzita osvětlení E_{max}	[lx]	1092	829	837
Rovnoměrnost osvětlení E_{min}/\bar{E}_m	[]	0,948	0,934	0,898
Okolní oblast				
Udržovaná intenzita osvětlení \bar{E}_m	[lx]	994	729	719
Minimální intenzita osvětlení E_{min}	[lx]	838	576	550
Maximální intenzita osvětlení E_{max}	[lx]	1122	842	824
Rovnoměrnost osvětlení E_{min}/\bar{E}_m	[]	0,843	0,790	0,765
Komunikační oblast				
Udržovaná intenzita osvětlení \bar{E}_m	[lx]	610	435	432
Minimální intenzita osvětlení E_{min}	[lx]	355	251	213
Maximální intenzita osvětlení E_{max}	[lx]	801	554	611
Rovnoměrnost osvětlení E_{min}/\bar{E}_m	[]	0,582	0,577	0,494

Vysoký instalovaný příkon původně navržené soustavy se sedmi svítidly Cruz 280 zajišťuje odpovídající intenzitu osvětlení v posuzovaných oblastech při velmi vysoké rovnoměrnosti, avšak z důvodu ne hospodárnosti nepředstavuje tato soustava s kompaktními zářivkami nejvhodnější řešení osvětlení.

Optimalizovaná soustava Cruz 280 se sníženým počtem svítidel na 5 dosahuje v pracovní oblasti udržované intenzity osvětlení $\bar{E}_m = 765 \text{ lx}$, což je při stejném rozestavení svítidel nejbližší vyšší hodnota požadovaným 750 lx, a zároveň nejbližší hodnota k porovnávané soustavě Fortimo 3000. Udržované intenzity osvětlení v okolní a komunikační oblasti jsou takřka shodné u obou uvedených soustav.

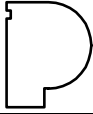
Je také zřejmé, že vyšší počet světelných míst soustavy Fortimo 3000 neznamena vyšší rovnoměrnost osvětlení v žádné z oblastí. Odlišnost křivek svítivosti porovnávaných soustav (viz datový list svítidla v příloze 19 a 39) tak vyznívá ve prospěch svítidel s kompaktními zářivkami. Rozdíl v rovnoměrnosti v řádu jednotek procent není očima rozeznatelný, negativní vliv na zrakovou pohodu je zanedbatelný.

Obě nově navržené soustavy jsou z hlediska udržované intenzity osvětlení a rovnoměrnosti osvětlení srovnatelné. Příkony jsou v poměru 161,9 % – 115,6 % – 100,0 %.

Jednotné omezení oslnění UGR_L

Následující tab. 8 shrnuje vypočtené hodnoty činitele oslnění UGR v místnosti A 2.31.

Tab. 8 Porovnání činitele oslnění v jednotlivých směrech v místnosti A 2.31 [15]

		Soustava Cruz 280	Optimalizovaná soustava Cruz 280	Soustava Fortimo 3000
Výška pohledu 1,5 m	Směr pohledu 0° →	20	20	18
	Směr pohledu 90° ↑	21	22	22
	Směr pohledu 180° ←	22	22	20
	Směr pohledu 270° ↓	22	22	21
Výška pohledu 1,2 m	Směr pohledu 35° ↗	15	16	10
	Směr pohledu 130° ↘	22	23	20

Hodnoty činitele oslnění UGR všech tří osvětlovacích soustav nepřesahují nejvyšší dovolenou hodnotu jednotného omezení oslnění $UGR_L = 22$ pro tento druh prostoru. Tyto čtyři standardní výpočtové plochy UGR ve výšce 1,5 m nad podlahou byly doplněny dvěma výpočtovými body UGR ve výšce 1,2 m, umístěnými ve stejném bodě s odlišným směrem. Představují pohled pracovníka sedícího na kancelářské židli do místa předpokládaného umístění monitoru počítače (směr pohledu 35°) a pohled na hosty sedící u stolu (směr pohledu 130°).

Ve všech šesti posuzovaných směrech způsobuje nejnižší oslnění osvětlovací soustava s diodovými svítidly Fortimo 3000. Oslnění způsobené svítidly Cruz 280 se v této místnosti pohybuje na hranici $UGR = 22$ a při výšce pohledu 1,2 m s orientací na hosty o bod překračuje.

6 ENERGETICKÉ A EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ NAVRŽENÝCH OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV

Naprostá většina investic je charakteristická časovou závislostí výdajů, případně příjmů, počítanou na roky až desetiletí. Odhadování těchto výdajů je provázeno nejistotou narůstající s časem. Vzniká tak problém, jak vzájemně porovnat tyto výdaje a zjistit návratnost investice. Čím je doba návratnosti kratší, tím je investice hodnocena lépe.

Často používanou metodou hodnocení investic je prostá doba návratnosti, která poskytuje jednoduché a přitom dostatečně použitelné vysvětlení; interpretace je srozumitelná i pro pracovníky bez hlubších ekonomických znalostí. Proto bude pro vyhodnocení návratnosti použita právě tato metoda.

Číselný ukazatel energie na osvětlení (LENI)

Tento ukazatel zavádí jednotné kritérium plošné spotřeby el. energie na osvětlení, uvádí se tedy v kilowatthodinách na metr čtvereční za rok $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$. Využívá se pro přímá srovnání energetické náročnosti osvětlení v budovách se stejným účelem, ale různými rozměry a uspořádáním. Hodnoty ukazatele LENI závisí na kvantitativních parametrech osvětlovací soustavy, způsobu jejího ovládání a využívání, typu budovy a přístupnosti denního světla. [5]

6.1 Osvětlení v místnosti B 2.21

6.1.1 Vyhodnocení navržených soustav

V následující tabulce 9 je z pohledu energetických a ekonomických parametrů porovnána původně navržená zářivková osvětlovací soustava Cruz 240 s nově uvažovanou diodovou osvětlovací soustavou Fortimo 2000 (místnost B 2.21).

Tab. 9 Porovnání investičních a provozních nákladů původní a nově navržené osvětlovací soustavy v místnosti B 2.21

		Původní soustava	Nově navržená soustava
<i>Parametry osvětlovací soustavy</i>			
Typ svítidel		Cruz 240	Fortimo 2000
Počet svítidel soustavy	[ks]	4	3
Příkon svítidla	[W]	51	29
Instalovaný příkon soustavy P_i	[W]	204	87
<i>Investiční náklady</i>			
Cena svítidla s předřadníkem	[Kč]	2300	2200
Cena světelného zdroje	[Kč]	2 x 100	
Pořizovací náklady na 1 svítidlo	[Kč]	2500	2200

Provozní náklady			
Spotřeba el. energie za 1 den	[kWh]	2,04	0,87
Spotřeba el. energie za 1 rok	[kWh]	526	224
Cena spotřebované el. energie za 1 rok	[Kč]	2630	1120
Celkové provozní náklady po 19 letech	[Kč]	49 970	21 280
Číselný ukazatel energie na osvětlení (LENI)	[kWh/(m ² · rok)]	37,07	15,79
Celkové náklady			
Celkové náklady po 19 letech	[Kč]	63 170	27 880
Poměrné celkové náklady po 19 letech	[%]	227	100
Návratnost investice do soustavy Fortimo 2000	[roky]	–	okamžitě

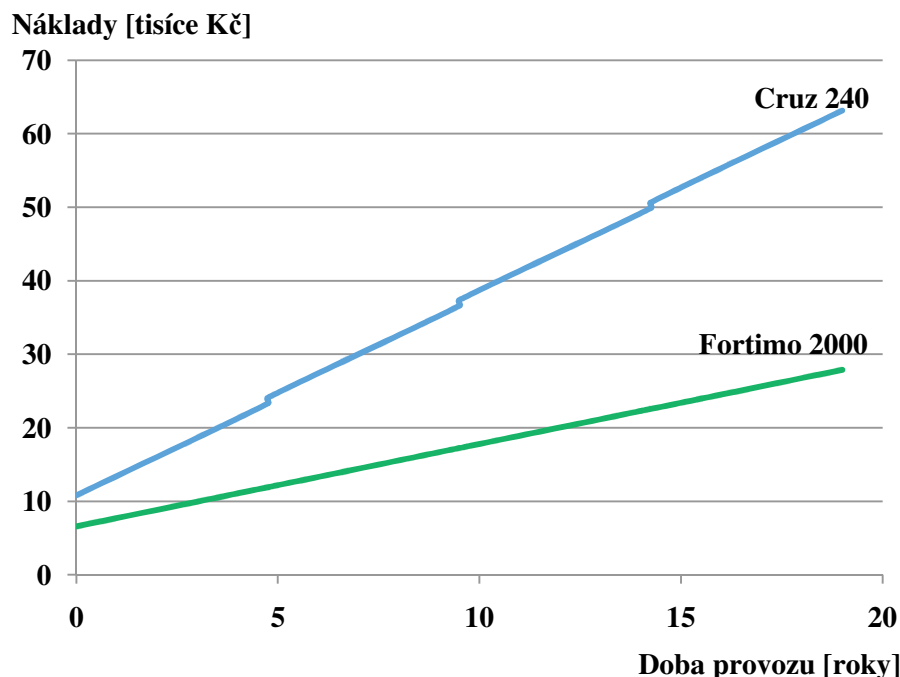
Při výpočtu je uvažována cena el. energie 5 Kč/kWh bez daně z přidané hodnoty, denní doba provozu 10 hodin, roční doba provozu 2580 hodin, plocha místnosti 14,19 m². Není uvažován vliv inflace ani náklady na montáž svítidel a na výměnu světelných zdrojů (z důvodu neurčitosti jejich vyčíslení v budoucnu).

Interval výměny světelných zdrojů vychází z jejich předpokládané doby života. V případě původní osvětlovací soustavy s kompaktními zářivkami udává výrobce po 12 000 hodinách provozu pokles světelného toku na 80 % počáteční hodnoty, což při roční době provozu 2580 hodin určuje interval výměny světelných zdrojů 4,75 roku (4 roky a 9 měsíců). Doba života světelných zdrojů Fortimo 2000 a jejich předřadníků je výrobcem stanovena na 50 000 hodin s poklesem světelného toku na 70 % počáteční hodnoty. Stejná provozní doba tak znamená životnost celého diodového svítidla 19 let, proto je výpočet sestaven pro právě tuto dobu provozování. Za 19 let provozu se ve svítidlech původní soustavy vystřídají 4 sady světelných zdrojů, v nové diodové soustavě právě skončí doba života prvního modulu.

Cena svítidel Cruz byla zjištěna dotazem na obchodního zástupce společnosti Thorn. Diodová svítidla Fortimo jsou ve fázi vývoje, jejich cenu prozatím nelze stanovit, tudíž je odhadnuta.

Nížší pořizovací náklady soustavy se třemi svítidly Fortimo 2000 zapříčiňují návratnost investice již samotným uvedením této soustavy do provozu (oproti nasazení soustavy Cruz 240). Roční úspora el. energie činí v tomto modelovém příkladě 302 kWh, což představuje přibližně 57% úsporu. Ve stejném poměru jsou i ostatní provozní náklady a ukazatel LENI, který při daném příkonu soustavy Fortimo 2000 a osvětlované ploše vychází na výborných 15,79 kWh/(m² · rok). Celkové náklady na provoz a údržbu po dobu 19 let by při realizaci původního projektu se čtyřmi svítidly Cruz 240 byly 2,27x vyšší.

Vývoj vynaložených nákladů na obě soustavy v čase názorně ilustruje obr. 47.



Obr. 47 Náklady na pořízení, provoz a výměnu světelných zdrojů osvětlovacích soustav v místnosti B 2.21

Je zřejmé, že náklady na pořízení svítidel vytvářejí počáteční náklady na každou ze soustav. Strmosti jejich nárůstu jsou vedle konstantní ceny za spotřebovanou el. energii určeny přímo úměrně instalovaným příkonem soustav. Na průběhu křivky nákladů soustavy Cruz 240 jsou rozeznatelné skokové nárůsty způsobené pořízením nových kompaktních zářivek v každém ze svítidel v intervalu 4,75 roku; výhodou je jejich nízká cena. Při uvažování 50% intervalu spolehlivosti obou druhů světelných zdrojů by právě nízká cena kompaktních zářivek vyzněla ve prospěch soustavy Cruz 240, protože při selhání poloviny diodových modulů Fortimo 2000, tvořících převážnou část ceny svítidla, by rozdíl v celkových nákladech mezi soustavami nebyl tak výrazný.

6.2 Osvětlení v místnosti A 2.31

6.2.1 Vyhodnocení navržených soustav

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, původně navržená soustava se svítidly Cruz 280 byla z pohledu udržované intenzity osvětlení v pracovní oblasti předimenzovaná. Proto byla pro porovnání k nově navržené diodové soustavě Fortimo 3000 vypracována varianta s původními svítidly, ale se sníženým počtem světelných míst. Jejich energetické a ekonomické parametry jsou porovnány v tab. 10.

Tab. 10 Porovnání investičních a provozních nákladů původní, optimalizované původní a nově navržené osvětlovací soustavy v místnosti A 2.31

		Původní soustava	Optimalizovaná původní soustava	Nově navržená soustava
Parametry osvětlovací soustavy				
Typ svítidel		Cruz 280	Cruz 280	Fortimo 3000
Počet svítidel soustavy	[ks]	7	5	6
Příkon svítidla	[W]	68	68	49
Instalovaný příkon soustavy P_i	[W]	476	340	294
Investiční náklady				
Cena svítidla s předřadníkem	[Kč]	2890	2890	3000
Cena světelného zdroje	[Kč]	2 x 100	2 x 100	
Pořizovací náklady na 1 svítidlo	[Kč]	3090	3090	3000
Provozní náklady				
Spotřeba el. energie za 1 den	[kWh]	4,76	3,40	2,94
Spotřeba el. energie za 1 rok	[kWh]	1228	877	759
Cena spotřebované el. energie za 1 rok	[Kč]	6140	4385	3795
Celkové provozní náklady po 19 letech	[Kč]	116 660	83 315	72 105
Číselný ukazatel energie na osvětlení (LENI)	[kWh/ (m ² · rok)]	67,29	48,05	41,59
Celkové náklady				
Celkové náklady po 19 letech	[Kč]	143 890	102 765	90 105
Poměrné celkové náklady po 19 letech	[%]	160	114	100
Návratnost investice do soustavy Fortimo 3000	[roky]	–	–	2 roky a 8 měsíců

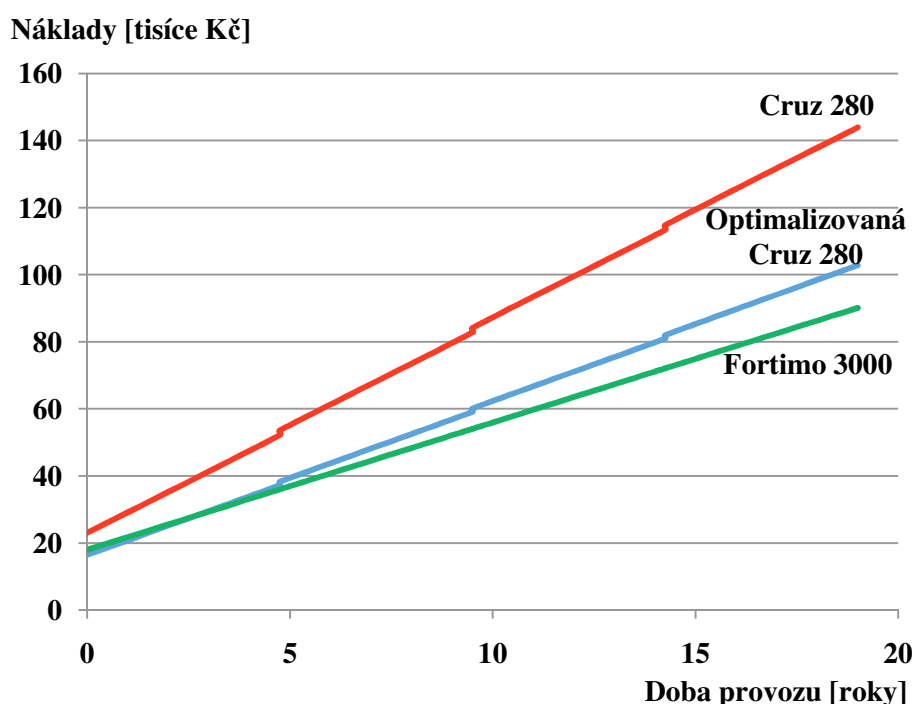
Výpočet uvažuje stejnou cenu el. energie, taktéž denní i roční dobu provozu osvětlovací soustavy. Plocha místnosti činí 18,25 m². Platí stejné zjednodušení v podobě nezahrnutí vlivu inflace, nákladů na montáž a na výměnu světelných zdrojů.

Výměna světelných zdrojů je opět stanovena v intervalu 4,75 roku pro svítidla Cruz 280 s kompaktními zářivkami a 19 let u svítidel Fortimo 3000 s diodovými moduly.

Uvedené finanční srovnání je pouze orientační, nezahrnuje proměny hodnoty finančních prostředků v čase. Při uvažování i relativně nízké meziroční inflace u této investice s 19letou životností by byl kumulativní efekt nárůstu ceny el. energie výrazný. Zvýšil by se podíl investičních nákladů z celkových nákladů, což by vyznělo zkrácením doby návratnosti ve prospěch diodových svítidel Fortimo, která jsou příkonově hospodárnější.

Návratnost nově navržené soustavy se svítidly Fortimo 3000 je v porovnání s optimalizovaným původním projektem s pěti svítidly Cruz 280 2 roky a 8 měsíců, v právě této době se náklady mezi uvedenými soustavami vyrovnají. Roční úspory el. energie činí 590 kWh. Po 19 letech by byl rozdíl v celkových nákladech mezi osvětlovacími soustavami pouze 12 660 korun, tedy 14 %. Ukazatel LENI nabývá vyšších hodnot než u předchozí místnosti B 2.21, protože pro dosažení udržované intenzity osvětlení 750 lx na pracovní oblasti je třeba vyšší instalovaný příkon soustavy.

Průběh nákladů na osvětlovací soustavu v čase znázorňuje obr. 48.



Obr. 48 Náklady na pořízení, provoz a výměnu světelných zdrojů osvětlovacích soustav v místnosti A 2.31

Odlišný sklon křivek opět ukazuje na rozdílnost instalovaných příkonů jednotlivých osvětlovacích soustav. Soustava se svítidly Fortimo 3000 tak po 2 letech a 8 měsících srovná nákladovou náročnost s optimalizovanou soustavou Cruz 280. Z grafu je také zřejmý větší poměr provozních nákladů k investičním nákladům kvůli vyšším instalovaným příkonům pro zajištění požadované intenzity osvětlení v pracovní oblasti a jejím okolí.

7 ZÁVĚR

Historický vývoj světelných diod doprovází trend postupného zvyšování měrného výkonu. Tento parametr, charakterizující účinnost přeměny el. energie na energii v podobě viditelného záření, dokládá současnou srovnatelnost s nejúčinnějšími světelnými zdroji. Přitom odhady vývoje v dalších letech předpokládají zdokonalení výrobních postupů, znamenající ještě vyšší účinnost. Už mnoho desetiletí je pravidlem snižování výrobních nákladů, což podle posledních odhadů umožní v roce 2015 nabízet široké veřejnosti plnohodnotné náhrady za stmívatelné kompaktní zářivky stmívatelnými diodovými světelnými zdroji za stejnou cenu – přibližně 10 amerických dolarů. Klasická žárovka, jejíž prodej je v posledních letech celosvětově omezován, tak získá nástupce, který pro vytvoření stejných světelných podmínek za akceptovatelnou cenu spotřebuje zlomek elektrické energie a vydrží svítit mnohonásobně déle.

Teoretické kapitoly poskytují informace o základních parametrech světelných diod, jsou uvedeny principy řízení světelného toku a zapojení k jejich realizaci. Ve čtvrté kapitole je popsán vliv stmívání na nejsledovanější parametry obou základních typů světelných diod. Stmíváním dochází ke změnám ve spektru záření. Mění se hodnoty a polohy dominantních vlnových délek podle použité metody řízení proudu a její úrovně. Důsledkem jsou změny náhradní teploty chromatičnosti vyzařovaného světla. Nejčastěji používané metody řízení – amplitudová a pulzně šířková modulace procházejícího proudu – mají ve většině případů odlišný směr změny ve spektru záření, resp. v diagramu chromatičnosti je vliv těchto základních metod podobně odlišný. Změny parametrů probíhají při amplitudové modulaci nelineárně, většinou ve větším rozsahu závisle proměnné veličiny než při pulzně šířkové modulaci, měnící se téměř lineárně v úzkém rozsahu.

V návaznosti na projekt osvětlení v nové multifunkční budově FEI VŠB – TUO byly vypočteny v programu DIALux parametry variantních soustav s diodovými svítidly Philips Fortimo. Vybrána byla předsíň pánských toalet (místnost B 2.21) a sekretariát (místnost A 2.31). Z výsledků výpočtů je zřejmé, že původně navržená osvětlovací soustava s kompaktními zářivkami v místnosti B 2.21 má srovnatelné parametry s nově navrženou diodovou soustavou. Původně navržená soustava v místnosti A 2.31 byla předimenzována, tudíž se zvolil menší počet světelných míst se stejnými svítidly. Nově navržené diodové soustavy v obou místnostech jsou nákladově přijatelnější než původně navržené soustavy s kompaktními zářivkami. Nižší jsou již pořizovací náklady, také roční náklady na provoz i celkové náklady za 19letou dobu životnosti osvětlovacích soustav jsou nižší.

Za svůj přínos považuji

Vytvoření uceleného přehledu historie světelných diod od objevu elektroluminiscence až po nejnovější odhady vývoje světelných diod do roku 2020.

Ověření parametrů diodového svítidla nové konstrukce na praktickém příkladě. Uvedené výpočty mohou sloužit jako výchozí dokumentace k rozhodnutí o nasazení diodových osvětlovacích soustav místo soustav původně navržených.

Tato diplomová práce obsahuje i další informace doposud nedostupné v česky psané literatuře.

8 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] NAKAMURA, S., CHICHIBU, S. F.: *Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes*. Florida: CRC Press, 2000. 386 s. ISBN 0-7484-0836-3.
- [2] RONDA, C. R.: *Luminescence: From Theory to Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 276 s. Dostupné z WWW: <http://books.google.com/books?id=ci-hP_h09D4C&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>. ISBN 978-3-527-31402-7.
- [3] SCHUBERT, E. F.: *Light-emitting diodes*. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 432 s. Dostupný z WWW: <http://books.google.com/books?id=0H4bWIpaXb0C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. ISBN 0-521-86538-8.
- [4] SOKANSKÝ, K., et al.: *Racionalizace v osvětlování venkovních prostor*. Ostrava: VŠB – TU, 2005. 197 s. Dostupné z WWW: <<http://csorsostrava.cz/publikace/racionalizace%20-%202005.pdf>>.
- [5] SOKANSKÝ, K., et al.: *Úspory energie v osvětlování při hodnocení energetické náročnosti budov*. Ostrava: VŠB – TU, 2009. 88 s. Dostupné z WWW: <http://csorsostrava.cz/publikace/Uspery_energie_v_osvetlovani_pri_hodnoceni_energeticke_narocnosti_budov/Zaverecna_zprava.pdf>.
- [6] DUPUIS, R. D., KRAMES, M. R.: History, Development, and Applications of High-Brightness Visible Light-Emitting Diodes. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2008, 26, 9, [cit. 2010-10-12]. Dostupný z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04542883>>.
- [7] HABEL, J., ŽÁK, P.: Energetická náročnost osvětlovacích soustav. *Světlo* [online]. 2010, 4, [cit. 2010-10-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41826.pdf>>.
- [8] NARUKAWA, Y., et al.: White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 19. 8. 2010, 43, [cit. 2010-12-10]. Dostupný z WWW: <http://iopscience.iop.org/0022-3727/43/35/354002/pdf/0022-3727_43_35_354002.pdf>.
- [9] PATTERSON, J.: Dimming Techniques for Switch-Mode LED Drivers. *Power Electronics Technology* [online]. 2010, 11, [cit. 2011-05-03]. Dostupný z WWW: <http://powerelectronics.com/images/DesignFeatures_1-1110.pdf>.

- [10] STEIGERWALD, D. A., et al.: Illumination with solid state lighting technology. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* [online]. 2002, 8, 2, [cit. 2011-05-03]. Dostupný z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=999186>>.
- [11] ZHELUDEV, N.: The life and times of the LED – a 100-year history. *Nature Photonics* [online]. 2007, 1, [cit. 2010-10-05]. Dostupný z WWW: <http://www.orc.soton.ac.uk/fileadmin/downloads/100_years_of_optoelectronics__2_.pdf>.
- [12] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004. 52 s.
- [13] ČSN 73 0580-1. *Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007. 24 s.
- [14] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., *kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci*. Praha: Úřad vlády České republiky, 2007.
- [15] *DIALux* [počítačový program]. Ver. 4.9.0.1. Lüdenscheid: DIAL, 2011 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.dial.de/download/dialux/download/4.9.0.1/dialuxsetup4901.exe>>.
- [16] BĘCZKOWSKI, S., MUNK-NIELSEN, S.: *Aalborg University* [online]. 2010 [cit. 2011-03-23]. LED Spectral and Power Characteristics Under Hybrid PWM/AM Dimming Strategy. Dostupné z WWW: <http://vbn.aau.dk/files/39948127/Led_spectral_and_power_characteristics_.pdf>.
- [17] BUSH, S.: *Electronics Weekly* [online]. 22. 11. 2010 [cit. 2010-12-06]. 50 year history of the LED. Dostupné z WWW: <<http://www.electronicsworld.com/Articles/2011/02/18/49501/50-year-history-of-the-LED.htm>>.
- [18] CARR, J. J., ROON, T. v.: *Sentex* [online]. 26. 10. 2010 [cit. 2010-11-23]. LED and Other Solid-State Light Sources. Dostupné z WWW: <<http://www.sentex.ca/~mec1995/tutorial/Leds/Leds.html>>.
- [19] CASANOVA, S.: *Philips* [online]. 16. 2. 2011 [cit. 2011-02-17]. Philips LED Lightbulb Is First 60-Watt Equivalent to Earn Energy Star Qualification. Dostupné z WWW: <http://www.newscenter.philips.com/main/lighting/news/press/20110216_60watt_Equivalent.wpd>.
- [20] DOWLING, K.: *U. S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. 11. 10. 2007 [cit. 2011-01-10]. LED Essentials. Dostupné z WWW: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/webinar_2007-10-11.pdf>.

- [21] DYBLE, M., et al.: *Lighting Research Center* [online]. 2005 [cit. 2011-03-27]. Impact of Dimming White LEDs: Chromaticity Shifts Due to Different Dimming Methods. Dostupné z WWW: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/pdf/dyble-SPIE2005.pdf>>.
- [22] FALIN, J.: *EP&Dee* [online]. 3. 4. 2010 [cit. 2010-12-27]. Choosing the optimal LED backlight driver for portable MFF displays. Dostupné z WWW: <<http://www.epd-ee.eu/article/6880>>.
- [23] GORDON, K.: *U. S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. 2008 [cit. 2011-01-17]. Color Quality of White LEDs. Dostupné z WWW: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/color_quality_of_white_leds.pdf>.
- [24] CHROBAK-KANDO, J.: *LEDs Magazine* [online]. 17. 4. 2011 [cit. 2011-04-17]. How to interpret LED lamp data. Dostupné z WWW: <<http://ledsmagazine.com/features/8/4/1>>.
- [25] KREJČÍ, R., HULICIUS, E.: *Microdesignum* [online]. 23. 4. 2007 [cit. 2010-10-14]. Polovodičové lasery a LED-ky. Dostupné z WWW: <<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>>.
- [26] LIN, Ch. H., HUANG, M. Ch.: *ITIS* [online]. 2010 [cit. 2010-12-13]. LED Lighting Industry. Dostupné z WWW: <<http://www.itis.org.tw/itisdata/English/2010/201000301.pdf>>.
- [27] LINGARD, R.: *U. S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. 2009 [cit. 2010-10-02]. Thermal Management of White LEDs. Dostupné z WWW: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal_mgt_white_leds.pdf>.
- [28] LINGARD, R.: *U. S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. 2009 [cit. 2010-10-02]. LED Luminaire Reliability. Dostupné z WWW: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/Luminaire_Reliability.pdf>.
- [29] LOO, K. H., et al.: On The Driving Techniques for High-Brightness LEDs. *Transactions on Power Electronics* [online]. 2009, 24, 12, [cit. 2011-03-22]. Dostupný z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05315972>>.
- [30] LOVIG, D.: *Cree* [online]. 27. 6. 2007 [cit. 2010-10-02]. Cree Announces Breakthrough 100-Lumen XLamp LEDs Available in Volume Quantities. Dostupné z WWW: <http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1182948090554>.

- [31] LOVIG, D.: *Cree* [online]. 7. 9. 2007 [cit. 2010-10-02]. Cree Achieves 1,000 Lumens from a Single LED. Dostupné z WWW: <http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1189169857943>.
- [32] MARTIN, P. S., et al.: *Lumileds Lighting LLC* [online]. [200-] [cit. 2010-27-11]. High Power White LED Technology for SSL. Dostupné z WWW: <<http://www.ele.uva.es/~pedro/optoele/LEDs/LEDilumination.pdf>>.
- [33] MARUSKA, H. P.: *SSLighting* [online]. [200-] [cit. 2011-10-15]. A Brief History of GaN Blue Light-Emitting Diodes . Dostupné z WWW: <http://www.sslighting.net/news/features/maruska_blue_led_history.pdf>.
- [34] MURRAY, M.: *Cree* [online]. 3. 2. 2010 [cit. 2010-10-03]. Cree Breaks 200 Lumen Per Watt Efficacy Barrier. Dostupné z WWW: <http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1265232091259>.
- [35] NARUKAWA, Y.: *PHYSorg* [online]. 31. 8. 2010 [cit. 2010-12-10]. White LEDs with super-high luminous efficacy could satisfy all general lighting needs. Dostupné z WWW: <www.physorg.com/pdf202453100.pdf>.
- [36] PHILLIPS, J. M.: *U. S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. 2006 [cit. 2010-11-21]. Basic Research Needs for Solid-State Lighting. Dostupné z WWW: <http://www.er.doe.gov/bes/reports/files/SSL_rpt.pdf>.
- [37] RICHARDSON, Ch.: *National Semiconductor* [online]. 2007 [cit. 2011-02-03]. LED Applications and Driving Techniques. Dostupné z WWW: <http://www.national.com/onlineseminar/2007/led/national_LEDseminar.pdf>.
- [38] SARHAN, S., RICHARDSON, Ch.: *EE Times* [online]. 27. 5. 2008 [cit. 2010-12-14]. A matter of light, Part 2 – Buck whenever possible. Dostupné z WWW: <<http://www.eetimes.com/design/power-management-design/4012232/A-matter-of-light-Part-2--Buck-whenever-possible>>.
- [39] SARHAN, S., RICHARDSON, Ch.: *EE Times* [online]. 31. 5. 2008 [cit. 2010-12-14]. A matter of light, Part 3 – When to boost and buck-boost. Dostupné z WWW: <<http://www.eetimes.com/design/power-management-design/4012234/A-matter-of-light-Part-3--When-to-boost-and-buck-boost>>.
- [40] SARHAN, S., RICHARDSON, Ch.: *EE Times* [online]. 5. 6. 2008 [cit. 2010-12-14]. A matter of light, Part 4 – PWM dimming. Dostupné z WWW: <<http://www.eetimes.com/design/power-management-design/4012236/A-matter-of-light-Part-4---PWM-dimming>>.

- [41] SHEEHAN, G.: Facts about Dimming. *LED Professional Review* [online]. 2011, 23, 1, [cit. 2011-03-08]. Dostupný z WWW: <http://w3.lightbasedtechnologies.com/files/White_Papers/Facts_About_Dimming.pdf>.
- [42] SCHUBERT, E. F., KIM, J. K.: *Rensselaer Polytechnic Institute* [online]. 2007 [cit. 2010-09-30]. Light-emitting diodes hit the centenary milestone. Dostupné z WWW: <<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Reprints/2007-Schubert-EF-Kim-JK-%28CompoundSemi%29-100-years-of-LEDs.pdf>>.
- [43] VIJAYAKUMAR, P., VORA, K.: *Cypress Semiconductor* [online]. 25. 1. 2010 [cit. 2011-01-14]. CCT and CRI in LED Lighting. Dostupné z WWW: <<http://www.cypress.com/?docID=27948>>.
- [44] Cree [online]. 2010 [cit. 2010-12-30]. Cree XLamp XP-C LEDs. Dostupné z WWW: <<http://www.cree.com/products/pdf/XLampXP-C.pdf>>.
- [45] *Encyclopedia of Renewable Energy and Sustainable Living* [online]. [200-] [cit. 2010-11-06]. Solid State Lighting. Dostupné z WWW: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE_solid_state_lighting.html>.
- [46] *Fakulta elektrotechniky a informatiky STU – Katedra mikroelektroniky* [online]. [200-] [cit. 2010-12-28]. Elektroluminiscenčné diódy. Dostupné z WWW: <http://www.kme.elf.stuba.sk/kme/buxus/docs/predmety/OEaLT/Prednasky/6_prednaska_LED.pdf>.
- [47] *Hobbielektronika* [online]. [200-] [cit. 2010-12-30]. Typical color-filter transmission spectrums illustrate how the RGB-LED spectrum. Dostupné z WWW: <<http://www.hobbielektronika.hu/forum/files/0e/0e8b74ba7ad7856caf4e762bba48762a.jpg>>.
- [48] Melexis [online]. 23. 3. 2007 [cit. 2011-02-18]. Application note MLX10803. Dostupné z WWW: <<http://www.melexis.com/Asset/PWM-dimming-using-MLX10803-DownloadLink-5268.aspx>>.
- [49] *Softpedia* [online]. 2009 [cit. 2010-10-01]. History of LEDs (Light Emitting Diodes). Dostupné z WWW: <<http://gadgets.softpedia.com/news/History-of-LEDs-Light-Emitting-Diodes-1487-01.html>>.
- [50] *U. S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. 2010 [cit. 2010-12-13]. Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan. Dostupné z WWW: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2010_web.pdf>.
- [51] *U. S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. 20. 4. 2011 [cit. 2011-04-20]. Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan. Dostupné z WWW: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2011_web.pdf>.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Datový list svítidla Thorn Cruz 240H 2 x 26 W TC-DEL HF
Příloha 2	Shrnutí – Místnost B 2.21 – Cruz 240
Příloha 3	Plán údržby – Místnost B 2.21 – Cruz 240
Příloha 4	Svítidla (situační plán) – Místnost B 2.21 – Cruz 240
Příloha 5	Uživatelská úroveň – Místnost B 2.21 – Cruz 240
Příloha 6	Výpočtová plocha UGR 1 – Místnost B 2.21 – Cruz 240
Příloha 7	Výpočtová plocha UGR 2 – Místnost B 2.21 – Cruz 240
Příloha 8	Výpočtová plocha UGR 3 – Místnost B 2.21 – Cruz 240
Příloha 9	Výpočtová plocha UGR 4 – Místnost B 2.21 – Cruz 240
Příloha 10	Datový list svítidla Philips Fortimo LED DLM 2000 29 W/840
Příloha 11	Shrnutí – Místnost B 2.21 – Fortimo 2000
Příloha 12	Plán údržby – Místnost B 2.21 – Fortimo 2000
Příloha 13	Svítidla (situační plán) – Místnost B 2.21 – Fortimo 2000
Příloha 14	Uživatelská úroveň – Místnost B 2.21 – Fortimo 2000
Příloha 15	Výpočtová plocha UGR 1 – Místnost B 2.21 – Fortimo 2000
Příloha 16	Výpočtová plocha UGR 2 – Místnost B 2.21 – Fortimo 2000
Příloha 17	Výpočtová plocha UGR 3 – Místnost B 2.21 – Fortimo 2000
Příloha 18	Výpočtová plocha UGR 4 – Místnost B 2.21 – Fortimo 2000
Příloha 19	Datový list svítidla Thorn Cruz 280H 2 x 32 W TC-TELI HF
Příloha 20	Shrnutí – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 21	Plán údržby – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 22	Svítidla (situační plán) – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 23	Pozorovatel UGR (přehled výsledků) – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 24	Pracoviště (přehled výsledků) – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 25	Komunikační oblast – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 26	Výpočtová plocha UGR 1 – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 27	Výpočtová plocha UGR 2 – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 28	Výpočtová plocha UGR 3 – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 29	Výpočtová plocha UGR 4 – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (7 svítidel)
Příloha 30	Shrnutí – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (5 svítidel)
Příloha 31	Svítidla (situační plán) – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (5 svítidel)
Příloha 32	Pozorovatel UGR (přehled výsledků) – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (5 svítidel)
Příloha 33	Pracoviště (přehled výsledků) – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (5 svítidel)
Příloha 34	Komunikační oblast – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (5 svítidel)
Příloha 35	Výpočtová plocha UGR 1 – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (5 svítidel)
Příloha 36	Výpočtová plocha UGR 2 – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (5 svítidel)

Příloha 37	Výpočtová plocha UGR 3 – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (5 svítidel)
Příloha 38	Výpočtová plocha UGR 4 – Místnost A 2.31 – Cruz 280 (5 svítidel)
Příloha 39	Datový list svítidla Philips Fortimo LED DLM 3000 49 W/840
Příloha 40	Shrnutí – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000
Příloha 41	Plán údržby – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000
Příloha 42	Svítidla (situační plán) – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000
Příloha 43	Pozorovatel UGR (přehled výsledků) – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000
Příloha 44	Pracoviště (přehled výsledků) – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000
Příloha 45	Komunikační oblast – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000
Příloha 46	Výpočtová plocha UGR 1 – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000
Příloha 47	Výpočtová plocha UGR 2 – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000
Příloha 48	Výpočtová plocha UGR 3 – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000
Příloha 49	Výpočtová plocha UGR 4 – Místnost A 2.31 – Fortimo 3000

